

Abschlussbericht der Fachhochschule Nordhausen
zum Verbundprojekt

Anwendung einer Fuzzy-Logikregelung für eine Hochdurchsatzbiogasanlage

gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Verbundprojekt:

Anwendung einer Fuzzy-Logikregelung für eine Hochlastbiogasanlage
gefördert durch die Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V.

Forderzeichen 22 01 86 06

Laufzeit: 01.11.2006 – 31.05.2010

Projektkonsortium:

Fachhochschule Nordhausen

Prof. Dr. G.-R. Vollmer, Projektleiter

Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW)

Prof. Dr. Paul Scherer, Projektleiter

Prof. Dr. G.-R. Vollmer, Projektleiter
Nordhausen, 31.07.2010

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	3
Abkürzungsverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	5

Teil I

Vorwort.....	6
1 Aufgabenstellung.....	7
2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	7
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	9
4 Stand von Wissenschaft und Technik	12
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	14

Teil II

1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses.....	15
1.1 Erweiterung der vorhandenen Versuchsanlage.....	15
1.2 Mess- und Untersuchungsprogramm	20
1.3 Versuchsreihe I.....	20
1.4 Umbau der Versuchsanlage.....	26
1.5 Testphase	29
1.6 Versuchsreihe II.....	29
1.7 Versuchsreihe III.....	49
1.8 Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion.....	52
2 Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	54
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	54
4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	55
5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	56
6 Durchgeführte/ geplante Veröffentlichungen.....	56

Wir bedanken uns bei der FNR für die Förderung und hervorragende Betreuung des Projektes „Anwendung einer Fuzzy-Logikregelung für eine Hochlastbiogasanlage“, insbesondere bei unseren Ansprechpartnerinnen Frau Schüsseler und Frau Gerlach.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fließschema der Versuchsanlage vor der Erweiterung	17
Abbildung 2: Fließschema der Versuchsanlage nach der Erweiterung (Nov. 06 - Mai 07)	19
Abbildung 3: Analysedaten der Versuchsanlage 25.05.07 – 21.09.07	21
Abbildung 4: Analysedaten der Versuchsanlage 24.09.07 – 27.11.07	23
Abbildung 5: Fettsäuremuster vom 25.05.2007 - 22.06.2007	24
Abbildung 6: Fettsäuremuster vom 23.06.2007 - 21.07.2007	24
Abbildung 7: Fettsäuremuster vom 22.07.2007 - 21.08.2007	25
Abbildung 8: Fließschema der Versuchsanlage nach dem Umbau (Nov. 07 - Mrz. 08)	28
Abbildung 9: Analysedaten der Versuchsanlage 26.05.08 - 19.08.08	30
Abbildung 10: Analysedaten der Versuchsanlage 26.05.08 - 19.08.08	31
Abbildung 11: Analysedaten der Versuchsbiogasanlage 19.08.08 - 23.10.08	32
Abbildung 12: Visualisierung: Flussbild BGA 2008 (unter LabVIEW konzipiert)	33
Abbildung 13: Analysedaten der Versuchsanlage 23.10.2008 - 31.12.2008	34
Abbildung 14: Analysedaten BGA-AKI 23.10.08 - 31.12.08	35
Abbildung 15: Analysedaten der Versuchsanlage 23.10.2008 - 31.12.2008	36
Abbildung 16: Analysedaten der BGA-AKI 01.01.09 - 31.03.09	37
Abbildung 17: Analysedaten der Versuchsanlage 01.01.09 - 31.03.09	37
Abbildung 18: Analysedaten Versuchsanlage 01.04.09 - 30.06.09	38
Abbildung 19: Analysedaten Versuchsanlage 01.04.09 - 30.06.09	39
Abbildung 20: Bildanalyse der mikrobiellen Population im Fermenter vom 26.08.08 und 28.05.09	40
Abbildung 21: Analysedaten der Versuchsanlage 01.07.2009 - 30.09.2009	42
Abbildung 22: Analysedaten der Versuchsanlage 01.07.2009 - 30.09.2009	43
Abbildung 23: Analysedaten der Versuchsanlage 01.10.2009 - 31.12.2009	44
Abbildung 24: Analysedaten der Versuchsanlage 01.10.2009 - 31.12.2009	45
Abbildung 25: Vergl. Bildanalysen der mikrob. Population im Fermenter v. 25.05.09 u. 14.10.09	46
Abbildung 26: Analysedaten der Versuchsanlage 01.01.2010 – 16.04.12.2010, Teil 1	47
Abbildung 27: Analysedaten der Versuchsanlage 01.01.2010 – 16.04.12.2010, Teil 2	48
Abbildung 28: Analysedaten der Versuchsanlage 17.04.2010 – 31.05.2010, Teil 1	50
Abbildung 29: Analysedaten der Versuchsanlage 17.04.2010 – 31.05.2010, Teil 2	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitspakete	9
Tabelle 2: Aufgabenverteilung	14
Tabelle 3: Bauliche Erweiterungen	18
Tabelle 4: Umbaumaßnahmen	27
Tabelle 5: Mikrobieller Qualitätsindex zur Bonitierung von Biogasreaktoren (Scherer 2009)	41

Abkürzungsverzeichnis

AB	Auffangbehälter
AcEq	Essigsäureäquivalent
AKI	August-Kramer-Institut
AP	Arbeitspaket
BR	Raumbelastung
BTN	Biotechnologie Nordhausen
C _{oTS}	Konzentration der organischen Trockensubstanz im Vorlagebehälter
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
F&E	Forschung und Entwicklung
FHN	Fachhochschule Nordhausen
FOS	Flüchtige organische Säuren
GPR	Gasproduktionsrate
GZ	Gesamtzahl
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
K	Korrektur
MB	Methanbildner
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NMF	Neuro-Fuzzy-Methoden
ORL	Organic loadet rate (Beschickungsmenge)
ORL _{max}	Maximale Beschickungsmenge
ORL _{neu}	neu berechnete Beschickungsmenge
oTS	Organische Trockensubstanz
PLR	Prozessleitrechner
spezGPR	spezifische Gasproduktionsrate
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TAC	Total alkalische Carbonate (Carbonat Pufferkapazität)
TOC	totale organic carbon (Gesamter organischer Kohlenstoff)
VB	Vorlagebehälter

Vorwort

Im Jahr 2008 betrug der Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch Deutschlands 9,7 % wovon 6,8 %, rund 70 %, auf die Nutzung von Biomasse zurückgeführt werden kann.¹ Die weitestgehenden Hoffnungen für die Erreichung der hochgesteckten Ziele zum Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland (2020) ruhen vor allem auf der Biomassenutzung.

Bis ins Jahr 2020 soll der Anteil der Erneuerbaren Energien am Energieendverbrauch laut Zielstellung der Bundesregierung auf 18 % ausgebaut werden.

Somit nimmt die Nutzung von Biomasse an der zukünftigen Energieerzeugung eine immer wichtigere Position ein.²

Mit 17 Mio. Hektar unterliegt cirka die Hälfte der Fläche Deutschlands der landwirtschaftlichen Nutzung. 12 Mio. Hektar werden als Ackerfläche genutzt wobei auf zwei Mio. Hektar Raps und Mais als nachwachsende Rohstoffe zur Erzeugung erneuerbarer Energien angebaut werden. Eine Erhöhung der Biomasseproduktion zur Energieerzeugung bedeutet zwangsläufig Nutzungskonkurrenzen, die eine differenzierte Biomassestrategie in der Land- und Forstwirtschaft erfordert. Daraus geht deutlich hervor, dass die Ausbaupotentiale im Bereich der Anbaubiomasse langfristig gesehen begrenzt sind. Gleiches gilt im Bereich der Abfallbiomasse.

Im Hinblick auf diesen Kontext ist es zwingend notwendig die Wirtschaftlichkeit der Biogas-erzeugung zu erhöhen und diese so effizient wie möglich zu gestalten.

¹ feste, flüssige, gasförmige Biomasse, biogener Anteil des Abfalls, Deponie- und Klärgas

² Quelle: BMU

Teil I

1 Aufgabenstellung

An der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg wurde in den letzten Jahren die Grundlage für eine vollautomatische Fuzzy-Logikregelung zur Vergärung von Speiseresten und Rübensilage im Labormaßstab geschaffen.

Diese Fuzzy-Logikregelung für einstufige Laborbiogasanlagen lief unter der Software von National Instruments und sollte aufgrund der Erfahrungen in Hamburg neu konzipiert und an die Versuchsanlage der Fachhochschule Nordhausen (1 m³ Fermentervolumen) angeschlossen werden. Im Rahmen des Vorhabens sollte die Versuchsanlage unter Anwendung der Fuzzy-Logikregelung zu einer Hochdurchsatzbiogasanlage ausgebaut werden, sodass mit Hilfe der neuen Regelstrategie höhere Raumbelastungen ($> 3 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) bei Monovergärung von Getreide) bei betriebssicherer Prozessführung möglich sind. Die Prozessstabilität ist mit zunehmender Größe der Biogasanlage für den ökonomischen Erfolg von erheblicher Bedeutung, da ein instabiler Gärprozess zu reduzierten Gaserträgen, bis hin zum mehrwöchigen Totalausfall führen kann.

Gesamtziel des Vorhabens war es, die im Labormaßstab entwickelte Fuzzy-Logikregelung in den kleintechnischen Maßstab umzusetzen und zu optimieren. Die energetische Effektivität der Verarbeitung von NawaRos sollte betriebssicher erhöht und eine Demonstrationsanlage für F&E-Zwecke geschaffen werden.

2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Bereits in den 80er Jahren entstand am Standort Nordhausen eine der größten landwirtschaftlichen Biogasanlagen Europas. Zahlreiche Forschungseinrichtungen, Unternehmen und Ingenieurbüros beschäftigen sich mit der Nutzung regenerativer Ressourcen aus Biomasse und haben anerkannte Leistungen und Erfolge im Innovationsfeld aufzuweisen. Diese historische Entwicklung wurde als regionaler Schwerpunkt auch durch die Fachhochschule Nordhausen aufgegriffen. Mit den Studiengängen Flächen- und Stoffrecycling, Regenerative Energietechnik und Technische Informatik orientiert sich Thüringens jüngste Fachhochschule an den regionalen Potentialen und forciert vielfältige technologische Entwicklungen mit interdisziplinärem Charakter.

Das seit 2006 bestehende und der Fachhochschule Nordhausen angehörige AUGUST-KRAMER-Institut (AKI) bietet mit seinen Arbeitsfeldern Energiesysteme, Werkstoff- und

Verfahrenstechnik sowie Geoengineering die zur Durchführung des Vorhabens nötigen Voraussetzungen. Im Bereich der Energiesysteme verfügt das Institut über eine 1 m³ große Versuchsanlage zur Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen. Sie besteht im Wesentlichen aus den Anlagenkomponenten: Vorlagebehälter mit Rührwerk (2,5 m³ Nutzvolumen), Edelstahl-Rührkesselreaktor (1 m³ Nutzvolumen), Auffangbehälter, Substratpumpe (1,1 kW Nennleistung), Wärmetauscher, Heizwassererwärmung, Biofilter mit Durchlüfterpumpe, Steuerungs- und Messtechnik, Pumpaggregate, Verrohrung und Schieber.

Professor Vollmer steht dem Vorhaben als Projektleiter und Fachexperte zur Seite. Ihm unterlag die wissenschaftliche Leitung der landwirtschaftlichen Biogasanlage der Tierzucht Nordhausen. Verfahrensträger war das damalige Institut für Biotechnologie der Akademie für Landwirtschaft.

Die energetische Verwertung des Bioabfalls im Landkreis Nordhausen in einer Biogasanlage wird nach dem Konzept von Prof. Vollmer praktiziert. Die Entwicklung resultiert aus einem durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Forschungsprojekt, ebenfalls unter seiner Leitung.

Projektpartner ist die Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg. Hier wurde unter der Leitung von Prof. Scherer und dem Einsatz von Modell-Speiseresten („Katzenfutter“) sowie Futterrübensilage als Mono-Input eine Fuzzy-Logikregelung für einstufige Laborbiogasanlagen entwickelt. Somit stehen Erfahrungen aus mittlerweile 9 Jahren ununterbrochener Vergärung von Futterrübensilage als Monosubstrat (ohne Güllezusatz) und davon über 6 Jahre unter Fuzzy-Logikregelung zur Verfügung. Aufgrund der Tatsache, dass es bislang nur etwa zwanzig Publikationen zur Vergärung unter Fuzzy-Regelung gibt und überraschend wenig Literatur, die eine Fuzzy-Regelung auch tatsächlich anwendet, bilden die in Hamburg gemachten Erfahrungen die wichtigste Grundlage für die zu erarbeitende Fuzzy-Logikregelung, die an der kleintechnischen Versuchsanlage der Fachhochschule Nordhausen im Rahmen des Vorhabens zum tragen kommen sollte.

Professor Scherer (Projektleiter) ist für die Vergärung von Feststoffen bei Fachkollegen, Ingenieurbüros und Anlagenfirmen seit 25 Jahren bekannt, da er kontinuierlich auf dem Gebiet der Vergärung publiziert. Er ist stellvertr. Sprecher der Arbeitsgruppe 14.2 „Vergärung“ der Abwassertechnischen Vereinigung ATV-DVWK, das gerade das neue technische Merkblatt M 380 zur Co-Vergärung erarbeitet hat.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Antragsteller (Fachhochschule Nordhausen) stellte mit Prof. Dr. Gerd Rainer Vollmer, (Biologische Verfahrenstechnik) und Herrn Dr. Jürgen Löffelholz (Fuzzy-Logikregelung) sowie unter zeitweise Mitwirkung von Frau Jana Henning-Jakob (Verfahrenstechnik) und Frau Anja Schreiber (Umwelttechnik) weitere fachliche und organisatorische Kompetenz und Kapazität in das Projekt ein. Weiterhin stellte die Fachhochschule Nordhausen Büroräume und Infrastruktur für die Projektmitarbeiter sowie die Versuchsanlage zur Vergärung und Anwendung der Fuzzy-Logikregelung im AUGUST-KRAMER-Institut zur Verfügung.

Die Aufgaben der Fachhochschule Nordhausen lagen in der Betreuung der Demonstrationsanlage, die Organisation und Durchführung des Versuchsbetriebes inklusive In- und Outputlogistik, der Messdatenerfassung und Zusammenstellung der Rohdaten aus der Routine-Fermenteranalytik sowie der Bestimmung der Abbauraten. Eine weitere Aufgabe war die Koordination der Zusammenarbeit der Partner und des Informationsaustausches.

Laut aktuellem Arbeitsplan waren sechs Arbeitspakete geplant, die teilweise in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner bzw. fachspezifisch vom Projektpartner bearbeitet wurden.

Tabelle 1: Arbeitspakete

Arbeitspaket	bearbeitender Projektpartner
(1) Aufbauphase der Fuzzy-Logikregelung	Fachhochschule Nordhausen Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
(2) Konzeption und Aufbau der Versuchsanlage	Fachhochschule Nordhausen
(3) Ermittlung der Abbauraten bei steigender Fermenterbelastung	Fachhochschule Nordhausen Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
(4) Bakterielle Begleituntersuchungen zu der Hochlastbiogasanlage	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
(5) Einfluss von stoßweisen Dosierungen	Fachhochschule Nordhausen
(6) Bestimmung der Fermentationsmetabolite der Hochlastbiogasanlage	Fachhochschule Nordhausen Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Nachstehend ist der Projektverlauf anhand einer Zeitschiene erläutert.

Erläuterungen zum Projektablauf:

Nov.2006

Vom Projektstart, im November 2006, bis April 2007 erfolgte die **Erweiterung** der im AUGUST-KRAMER-Institut befindlichen **Versuchsanlage** um die für die Durchführung des Projektes notwendigen Komponenten. Der Leistungsumfang bestand aus der Planung und den Einbau einer automatischen Ansteuerung der bereits vorhandenen Pumpen, Schieber und Rührwerke. Die Programmierung erfolgte mit STEP7 und LabVIEW. Zusätzlich wurden Warnsysteme installiert, der Einbau von Sonden zur pH-Wert- und Redoxpotentialmessung, die automatische Datenerfassung mit Visualisierung auf dem Prozessleitrechner sowie eine Datenübertragung per Internet im 10-Minuten-Takt an den Projektpartner HAW Hamburg realisiert. (1), (2)

Mai 2007

Versuchsreihe I: Das erste Messprogramm startete im Mai 2007 und erstreckte sich über einen Versuchszeitraum von fünf Monaten. Die Fermenterbeschickung erfolgte in dieser Zeit stoßweise einmal täglich per Handfütterung. Als Substrat wurde mit Wasser angemischte Gerste verwendet. Die Kontrolle der Prozesssicherheit der Versuchsanlage erfolgte über den Prozessleitrechner (PLR) und die Dokumentation und Auswertung der Prozessparameter (Gasmenge, CH_4 -, CO_2 -, O_2 -, H_2S -Gehalt im Biogas sowie Temperatur im Fermenter, pH-Wert und Redoxpotential im Fermentersubstrat). Die Prozesskontrolle wurde komplettiert durch die wöchentliche laboranalytische Untersuchung des Fermenterinhaltendes über die BTN. (3), (5), (6)

Nov. 2007

Bereits während des ersten Messprogramms wurde die Notwendigkeit eines zusätzlichen **Umbaus** der **Versuchsanlage** ersichtlich und geplant. Es sollte der Betrieb von manueller Substratzugabe ohne Rückpumpen (Abwasserprobleme) zu automatischer Substratzugabe mit Rückpumpen (weniger Abwasserprobleme) überführt werden. Diese Automatisierung war wiederum auch Voraussetzung für die Fuzzy-Logikregelung. Daraus folgend wurde das Rohrleitungssystem durch eine Verbindung zwischen Auffangbehälter, Pumpe und Vorratsbehälter erweitert, sodass nach der automatischen Beschickung Medium zurückgepumpt werden konnte. Die Erfassung der Daten von der Ver-



März 2008

suchsanlage (Speicherung in ACCESS-Datenbank, Visualisierung mit LabVIEW im Daten-Logger und Monitor) auf den PLR sowie die Übertragung der aktuellen Daten per Internet zum Projektpartner wurde entsprechend erweitert/an-gepasst und auf den Zeit-Takt 1 Stunde geändert. Das **Fuzzy-Regelsystem** wurde über eine Schnittstelle im Prozessleitrechner an die Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) angekoppelt. Die Datenbank, die Visualisierung und der Daten-Logger wurden entsprechend erweitert, ebenso das C-Programm für den Daten-Transfer über das Internet. (1), (2)

Mai 2008

Testphase: Diese Phase diente als Test nach dem Umbau. Zu Beginn wurde der Fermenter mit vergorener Schweinegülle beimpft und die Anlage langsam angefahren. Die Beschickung erfolgte mit 0,5 kg – 2,0 kg oTS Triticale pro Tag und m³ angemaischt mit der doppelten Menge Wasser. Während der Testphase traten mehrere Defekte auf (Gasuhr, Redox-Sonde, Biogas-Controller, Druck-Sensor, Gastherme), wodurch sich der Start der neuen Versuchsreihe verzögerte.

Okt. 2008

Versuchsreihe II: Die Biogasanlage wurde nun automatisiert betrieben. Zu Beginn wurden Vorrats- und Auffangbehälter mit je 500 Liter Wasser gefüllt. Die Automatik pumpte nun 3 x täglich im acht Stunden-Takt jeweils 50 Liter Medium (Substrat und Wasser) aus dem Vorratsbehälter in den Fermenter. Damit der Prozess stationär blieb, wurde jetzt täglich aus dem Auffangbehälter zurückgepumpt sowie 20 Liter Medium abgelassen – wie bei einer großtechnischen Anlage. (1), (3), (5), (6)

Ab diesem Zeitpunkt wurde die Versuchsanlage bis zum Projektende (bis auf Unterbrechungen in den Monaten April, Mai 2009, und den Winterpausen) vollautomatisch per **Fuzzy-Logikregelung** geregelt, d.h. das LabVIEW-Programm ermittelt aus den drei aktuellen Daten von GPR, pH-Wert und CH₄-Anteil sowie der letzten organic loading rate (OLR) zunächst die spezifische Gasbildungsrate pro Tag (spezGPR) und dann die neue Beschickungsmenge pro Tag (OLRneu). Die Substratzugabe erfolgte drei bzw. kurzfristig (Juli - Aug.) zwei Mal täglich. Im Zeitraum April bis Mai 2009 wurde die Fuzzy-Logikregelung aufgrund von Stö-



April 2010

rungen im Fermentationsprozess deaktiviert und nach der Anpassung der Fuzzyregeln sowie der Stabilisierung des Fermentationsprozesses anschließend wieder in Betrieb genommen. (1), (3), (4), (5), (6)

Im April 2010 startete nach einer Neubeimpfung die dritte Versuchsreihe unter Verwendung eines Substratgemisches bestehend aus 70 % Triticale und 30 % Gerste. Am 31.05.2010 endete das Forschungsvorhaben. Die gewonnenen Daten wurden ausgewertet und im **Abschlussbericht** zusammengefasst.

Die Anpassung der Fuzzyregeln an unterschiedliches Gärverhalten erfolgte über die gesamte Projektlaufzeit (AP1). Arbeitspaket (2) beinhaltete die hardwaremäßige Entwicklung eines Hochlastfermenters, die zu Projektbeginn durch den Einbau der entsprechenden Messsonden und den späteren Umbau realisiert wurde. Die Ermittlung der Abbauraten bei steigender Fermenterbelastung (AP 3), der bakteriellen Begleituntersuchung der Hochlastbiogasanlage (AP 4) sowie der stoßweisen Dosierung (AP 5) wurden in den einzelnen Versuchsreihen durchgeführt. Die Bestimmung der Fermentationsmetabolite der Hochlastbiogasanlage (AP 6) erfolgte über die gesamte Projektlaufzeit.

4 Stand von Wissenschaft und Technik

Für die Prozesssteuerung von Biogasanlagen wird teilweise die Bestimmung der wasserdampflichen Karbonsäuren (bestimmt als Essigsäure) genutzt.

Dazu sind Probeentnahmen und laboranalytische Untersuchungen notwendig. Online-Bestimmungen der Karbonsäuren mit chromatographischen Methoden sind zu aufwendig sowie stör anfällig und deshalb nicht praxisrelevant (Tippe, 1998; Feitkenhauer et al., 2002).

Die Bestimmung des pH-Wertes als alleiniger Prozesspartner ist insofern problematisch, als das sinkende pH-Werte das Ergebnis von Prozessstörungen sind und Fermentationen häufig im Karbonatpufferbereich gefahren werden, d.h. Verschiebungen zu spät detektiert werden (Cheng u. Lo, 1998).

Neuere Strategien zur Regelung von Biogasanlagen sehen die Anwendung von Neuro-Fuzzy-Methoden (NMF) vor. Es gibt in der Literatur etwa 20 Publikationen bislang, die sich mit Fuzzy-Regelung bei der Vergärung beschäftigen, aber es gibt überraschend wenig Literatur, die eine Fuzzy-Regelung tatsächlich anwendet, insbesondere bei Feststoffen. Bei die-

sen Arbeiten liegen die Betriebszeiten lediglich zwischen 10 Stunden und 65 Tagen (Holubar et al. 2003).

Untersuchungen zur Auswirkung kurzfristiger Substratwechsel auf Prozesse zur Bioabfallvergärung legten die Entwicklung einer substratsensitiven Fuzzy-Regelung nahe, die der Praxis von Co-Vergärungsanlagen entgegenkommt (Jung et al., 1999).

Durch künstliche Herstellung instabiler Betriebszustände in Laboranlagen konnten entsprechende Basisdaten für die Früherkennung von Prozessstörungen erfasst werden (Patzwahl et al. 2001), eine Regelung erfolgte noch nicht.

Mittels Vergärung von einem eiweiß- und fettreichen Modellsubstrat für Speisereste nach dem Hypertherm®-Verfahren (Scherer et al. 2000) wurden in einem ersten Schritt unter Einsatz von 4 - 8 selektierten Messgrößen 90 Fuzzy-Steuerregeln zur Substratzufuhr eines Biogasreaktors entwickelt, welche aber noch nicht als eine Regelung im halbtechnischen bzw. praktischen Betrieb getestet werden konnten (Adul-Kholiq und Scherer 2002).

An der HAW Hamburg konnten mit einer Laboranlage kontinuierliche Fermentationen über einen Zeitraum von mittlerweile 6 Jahren durchgeführt werden, die vollautomatisch mit einer Fuzzy-Logikregelung betrieben wurden. Die erste Fermentationsperiode von nahezu 5 Jahren wurde lückenlos dokumentiert (DBU AZ 08866, Scherer und Lehmann 2004 a, b). Vergoren wurde Silage von einer Hofanlage, die Rübensilage ohne Gülle als Monoinputsubstrat verwendete. Dabei konnte die Fuzzy-Logikregelung bislang nicht erreichte Ergebnisse erzielen und die Raumzeitausbeute um den Faktor 8 steigern, wenn man die landwirtschaftliche Betriebsanlage hierzu parallel betrachtete. Dies bedeutete, dass die 100 kW el. Hofanlage mit 14,3 kg Organik ($\text{oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$), mit einer volumetrischen Gasproduktion von $8,3 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ und einer Verweilzeit von lediglich 6,5 Tagen stabil hätte betrieben werden können. Die parallele Hofanlage mit dem gleichen Substrat wurde mit $1,1 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ Gasproduktion bei 48 - 57 Tagen Verweilzeit betrieben. Solche extrem hohen Raumzeitausbeuten sind bisher aus der Literatur nicht bekannt. Sie erfordern nicht nur eine Steuerung, sondern auch eine automatische Regelung.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg war am Projekt beteiligter Partner. Sie legte in dem Vorfeld des Projektes die Grundlage für eine vollautomatisierte Fuzzy-Logikregelung zur Vergärung von Speiseresten und Rübensilage. In Zusammenarbeit mit der FHN sollte diese im Labormaßstab entwickelte Fuzzy-Logikregelung in den kleintechnischen Maßstab umgesetzt und damit eine Demonstrationsanlage für F&E-Zwecke geschaffen werden.

Die Aufgabenverteilung zwischen den beiden Partnern ist im Nachstehenden dargestellt.

Tabelle 2: Aufgabenverteilung

Partner	Aufgaben
Fachhochschule Nordhausen	Betreuung der Demonstrationsanlage Organisation und Durchführung des Versuchsbetriebes inklusive Input- und Outputlogistik Messdatenerfassung, Zusammenstellung der Rohdaten aus der Routine-Fermenteranalytik, Bestimmung der Abbauraten Zusammenarbeit der Partner und Informationsaustausch
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg	Programmierung des Prozessleitsystems Zugang zur SPS des Leitrechners in Hamburg über Internet Aufbau eines Referenz-Laborreaktors mit Siemens SPS7 Erprobung eines Regelkonzepts im Referenzbetrieb Datenübertragung zwischen SPS und Leitrechner Gaschromatographische und enzymatische Begleitanalytik Mikroskopische Bildanalytik mit Fluoreszenzmikroskop Zusammenarbeit der Partner und Informationsaustausch

Im Rahmen der Vergabe von Aufträgen an Dritte realisierte die Firma R&G ESMR-Technik GmbH die Umstellung der manuellen Beschickung auf Automatikbetrieb.

Teil II

1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

1.1 Erweiterung der vorhandenen Versuchsanlage

Beschreibung der Versuchsanlage zum Zeitpunkt 01.11.2006

Die Anlage ist als Innenraumanlagen im AUGUST-KRAMER-Institut an der FH Nordhausen aufgestellt. Sie besteht im Wesentlichen aus folgend aufgeführten Anlagenkomponenten:

- Vorlagebehälter mit Rührwerk (VB)
- Rührkesselreaktor
- Auffangbehälter (AB)
- Substratpumpe
- Wärmetauscher
- Heizwassererwärmung
- Biofilter mit Durchlüfterpumpe
- Steuerungs- und Messtechnik
- Pumpaggregate
- Verrohrung und Schieber



Der Vorlagebehälter dient zum Lagern und Vorbereiten des Anlagen-Inputs und verfügt über ein Nutzvolumen von 2,5 m³. Als Material wurde Stahl St 37-2 verwendet der innen und außen mit einem umfassenden Korrosionsschutz versehen ist. In dem Vorlagenbehälter ist ein zentrales Vertikalrührwerk mit einer Nennleistung von 1,1 kW zum Durchmischen (Anmischen) des Anlagen-Inputs montiert. Um eine optimale Durchmischung zu erreichen, wurde der Antrieb drehzahlvariabel ausgeführt. Die Drehzahländerung erfolgt über einen in die Schaltanlage integrierten Frequenzumrichter im Bereich von 0 ... 50 Hz => 0...250 U/min.

Die anaerobe Vergärung des Substrates erfolgt im Fermenter. Dabei handelt es sich um ein zylindrisches Gefäß aus Edelstahl 1.4404 mit einem Nutzvolumen von 1 m³. Um die Schichtenbildung zu verhindern und den Gasaustritt zu beschleunigen, wird zur Durchmischung der Reaktionsmasse ein zentrales Vertikalrührwerk mit einer Nennleistung von 1,1 kW verwendet. Auch dieses Rührwerk wird über einen Frequenzumrichter betrieben, um eine Drehzahlvariabilität zu erreichen. Zusätzlich verfügt der Fermenter zur biologischen Entschwefelung über eine externe Durchlüftungspumpe zum Einblasen von Frischluft (aus dem Raum). Zur Aufnahme von Messtechnik ist der Fermenter mit den entsprechenden Prozessanschlüssen ausgestattet. Die Zwischenlagerung des Gärrestes erfolgt in einem Auffangbehälter, er ist baugleich zum Vorlagebehälter ausgeführt.

Die Erwärmung des Substrates im mesophilen Bereich wird mit Hilfe eines externen Wärmeübertragers mit dem dazugehörigen Heißwassererwärmer vorgenommen. Bei dem Wärmetauscher handelt es sich um einen Spiralwärmeübertrager der Firma Mißbach & Gärtner. Das verwendete Material ist Aluminiumguss, wodurch sich ein guter Wärmeübergang gewährleistet wird. Zum Erhitzen des benötigten Warmwassers wird eine Gastherme der Firma WOLF eingesetzt.

Zum Beschicken und Entleeren der Behälter, sowie zur Zirkulation des Substrates ist eine zentrale Exzentrerschneckenpumpe installiert. Sie wird über einen Frequenzumrichter betrieben, um die Durchflussmenge variabel gestalten zu können. Die Nennleistung der Pumpe beträgt 1,1 kW. Um die Pumpe vor Beschädigungen durch Trockenlauf zu schützen, ist in den Stator der Pumpe eine Temperaturüberwachung integriert. Der Aufstellungsort und die Verrohrung sind so ausgeführt, dass die zentrale Pumpe alle, innerhalb der Anlage, erforderlichen Substrattransporte ausführen kann.

Das Biogas, das in der Anlage erzeugt wird, wird derzeit lediglich analysiert, es erfolgt keine Verwertung des Gases. Um das abzugebende Gas zu reinigen ist ein Rohrbiofilter installiert worden. Der Biofilter arbeitet passiv und verfügt über keine steuerungstechnisch relevanten Einrichtungen. Abbildung 1, Seite 17 veranschaulicht die Versuchsanlage als Fließschema.

Erweiterung der Versuchsanlage

Im Anschluss an den Projektauftritt erfolgte über den Zeitraum 01.11.2006 bis 24.05.2007 die Erweiterung der Hochlastbiogasanlage der Fachhochschule Nordhausen. Dieses Vorhaben war die Grundvoraussetzung für die Installation und kontinuierlichen Optimierung der an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften entwickelten vollautomatischen Fuzzy-Logikregelung.

Die in Hamburg erfolgreich validierte Regelung zur Vergärung von Speiseresten und Rübensilage basiert auf der Nutzung und Bewertung der drei Inputparameter pH-Wert, spezifische Gasproduktionsrate (spezGPR) und den Methangehalt im Biogas. Die pH-Wert-Kontrolle ist insbesondere bei der Verwendung von sauren Silagen wichtig. Über die spezifische GPR können Aussagen über die Reaktoraktivität bezogen auf die Substratmenge getroffen werden. Abnormalitäten, z.B. von Hefen, die ebenfalls Biogas (CO_2) produzieren, können über die Messung des Methangehaltes im Abgas entdeckt werden. Dementsprechend erfolgte die Erweiterung der Messdaten um den Einbau eines Sensors zur pH-Wert-Messung und als zusätzliche Kontrolle der Prozessstabilität eines Sensors zur Messung des Redoxpotentials.

Zur vollautomatischen Steuerung der Hochlastbiogasanlage mittels Fuzzy-Logikregelung erfolgte der Einbau der automatischen Steuerung der vorhandenen Schieber, Rührwerke und Pumpen. Der für defekte und für die automatische Beschickung notwendige Sensor zur Füllstandsmessung wurde im Vorlagebehälter erneuert.

Tabelle 3: Bauliche Erweiterungen

Biogasanlage	Bauliche Erweiterung	Wirkung
	pH-Sonde	Messung des pH-Wertes
	Redox-Sonde	Messung des Redoxpotentials
	SPS-Steuerung	automatische Steuerung der Schieber, Rührwerke, Pumpen
	Austausch Füllstandssensor	Messung der Füllstandshöhe im Vorlagebehälter

Die in Tabelle 3 aufgeführten baulichen Erweiterungen sind im Fließschema der Versuchsanlage (Abbildung 2, Seite 19) dargestellt.

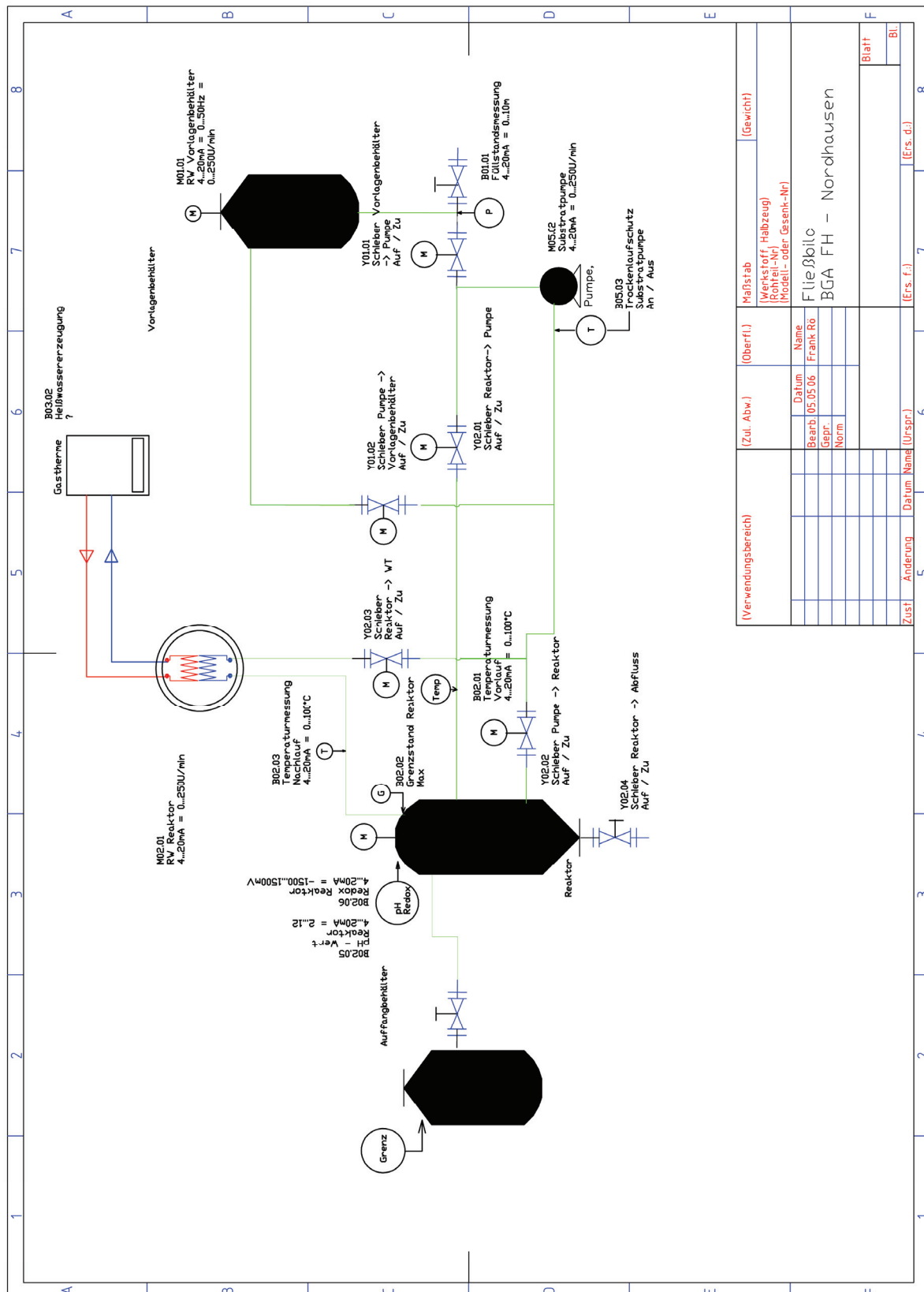


Abbildung 2: Fließschema der Versuchsanlage nach der Erweiterung (Nov. 06 - Mai 07)

1.2 Mess- und Untersuchungsprogramm

Der Fermenter wurde zu Beginn der Versuchsreihe mit 1 m³ vergorener Gülle als Impfmateri-
al befüllt und im Untersuchungszeitraum diskontinuierlich mit Triticalien beschickt. Als Be-
triebsweise wurde der mesophile Temperaturbereich ($T = 38^{\circ}\text{C}$) gewählt.

Die erzeugte Biogasmenge wurde über Präzisionsgaszähler (GMT 2.5, 1 Impuls/10 l Gas) er-
fasst, die Gaszusammensetzung (CH_4 , CO_2 , H_2S) kontinuierlich gemessen. Weitere online-
Messungen sind pH-Wert, Temperatur und Redoxpotential. Zudem wurde die Drehzahl der
Rührwerke sowie die Pumpenfördermenge automatisch erfasst und war spezifisch über die
Messtechnik regelbar.

Die Ausgangssubstrate, der Fermenterinhalt und die Endprodukte wurden auf verschiedene
Parameter (Trockensubstanz, organische Trockensubstanz, Karbonsäuren, TOC, Stickstoff,
Ammonium-Stickstoff, Phosphor etc.) analysiert: Für die Ausgangssubstrate erfolgt die Ana-
lytik in Monatsmischproben, für TOC und die Nährstoffe im Ablauf ebenfalls. Die Karbonsäu-
ren, Trockensubstanz und organische Trockensubstanz wurden wöchentlich, der FOS/TAC-
Wert anfangs wöchentlich, anschließend täglich erfasst.

Weiterhin ergab sich im Rahmen einer Diplomarbeit, dass für den Zeitraum April 2007 bis
September 2007 eine Vergleichsanalytik an der Fachhochschule Nordhausen durchgeführt
wurde. Untersucht wurden dabei insbesondere die im Gärprozess gebildeten Karbonsäuren.
Zum einen durch ein Schnelltestverfahren, die FOS/TAC-Titration, zum anderen durch ein
chromatographisches Analyseverfahren, welches die Möglichkeit eröffnet, detaillierte Anga-
ben zur Qualität und Quantität der im Prozess gebildeten Säuren zu erhalten. Eine darauf
aufbauende Diplomarbeit wurde im Zeitraum April 2009 bis Oktober 2009 angefertigt. Unter-
sucht wurde der Einfluss der Karbonsäuren und des FOS/TAC auf die Schwefelwasserstoff-
konzentration im Biogas. Die Analytik erfolgte wie obig über ein chromatographisches Analy-
severfahren zur Karbonsäurenbestimmung und mittels des Schnellanalysegerätes TIM Bio-
gastitrator zur FOS/TAC-Bestimmung. Die Schwefelwasserstoffkonzentration wurde mit Hilfe
des installierten Biogascontroller und Drägersröhrchen bestimmt.

1.3 Versuchsreihe I

Im Zeitraum vom 24.05.2007 bis 27.11.2007 fand im Anschluss an die Erweiterung der Ver-
suchsanlage die erste Versuchsreihe unter Betrachtung der Abbauraten bei steigender Fer-
menterbelastung und Kontrolle der Belastungssteigerung statt. Die Fermenterbeschickung
erfolgte in dieser Zeit stoßweise und einmal täglich per Hand über ein am Fermenter ange-
brachtes Beschickungsrohr. Parallel zu dieser Versuchsreihe wurde in Zusammenarbeit mit
dem Projektpartner in Hamburg an der Anpassung der Fuzzy-Logikregelung gearbeitet.

Betrachtung der Parameter Fettsäuren (Summe); Raumbelastung, Gasmenge und Methangehalt

Fettsäuresumme, Gasmenge und Methangehalt sind neben anderen Analysewerten wichtige Parameter zur Beurteilung der Prozessstabilität. Bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen soll durch eine stete Kontrolle der Prozessparameter und eventuellen kurzzeitigen Ruhephasen ohne Substratzugabe einem wirtschaftlichen Schaden durch eine Fermenterversäuerung entgegengewirkt werden. Im Rahmen der im Vorhaben geplanten Belastungssteigerung wurde jedoch der Gärprozess kontinuierlich überwacht, um zum einen Aussagen über den punktuellen Stabilitätszustand zu treffen und um zum anderen die Grenzen der Prozessstabilität für das verwendete Substrat festzustellen.

Beginnend mit einer Raumbelastung von 1,25 kg oTS/(m³ *d) wurde die Belastung des Fermenters manuell stufenweise und ohne Fuzzyregelung gesteigert, um somit die Grenzbelastung zu ermitteln. Um einen genaueren Überblick über die Steigerung der Raumbelastung und der damit einhergehende Veränderungen der Prozessparameter der kleintechnischen Biogasanlage zu erlangen, sind in den folgenden Abbildungen die Raumbelastung, die täglich gebildete Gasmenge, der Methangehalt und die Fettsäuren in Summe gegenübergestellt. Der von Peak's geprägte Kurvenverlauf, insbesondere der Prozessparameter CH₄-Gehalt und Gasmenge/Tag, ist auf die variierenden Betriebszustände der Anlage, sowie vereinzelte Aussetzung der Substratzufuhr an den Wochenenden zurückzuführen.

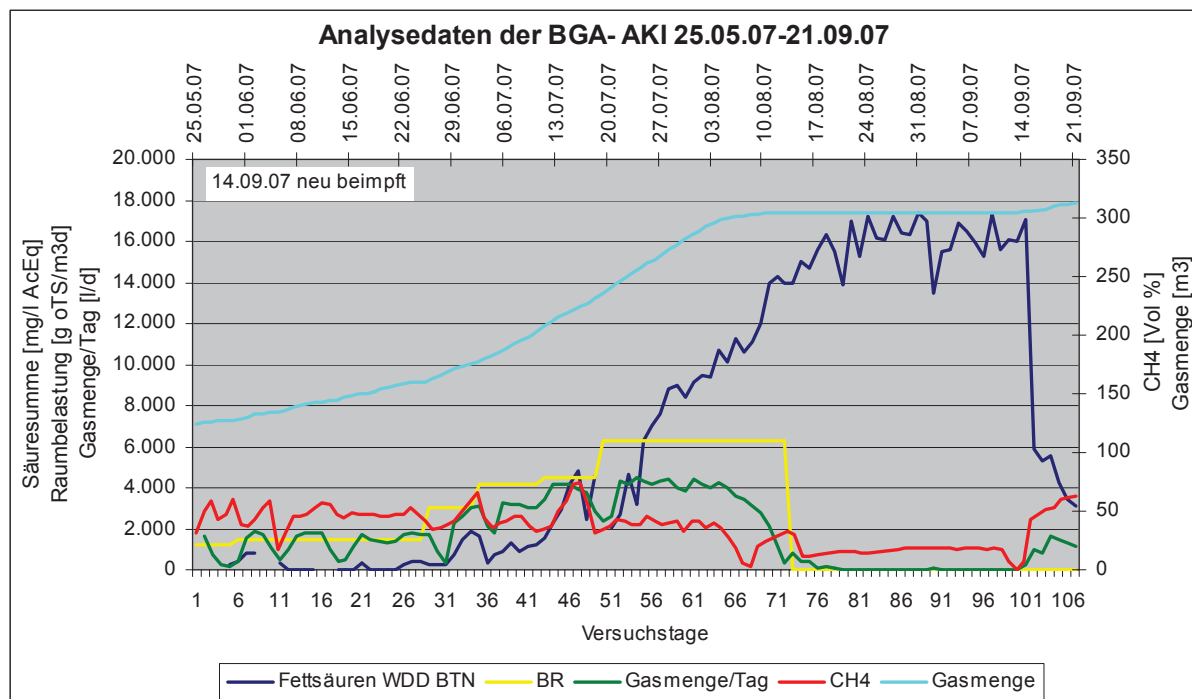


Abbildung 3: Analysedaten der Versuchsanlage 25.05.07 – 21.09.07

Abbildung 3 zeigt die schrittweise Erhöhung der Raumbelastung. Ausgehend von $1,25 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ erfolgte bereits am 6. Versuchstag eine geringfügige Steigerung auf $1,5 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. Diese wurde bis zum 32. Versuchstag beibehalten, um bei weiteren Steigerungen stabile Ergebnisse und eine gut ausgebildete Mikroorganismenflora zu erhalten. Die erneute Erhöhung auf zunächst $3 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ führte nur zu einer geringfügigen Erhöhung der Fettsäuren sowie des Methangehaltes. Da ein kurzzeitiger Substratstopp eine sofortige Erholung der Biologie, sprich einen Rückgang der Säuren, verursacht und sich zudem in abnehmenden Gas- und Methangehalten widerspiegelt, wurde bereits nach 10 Tagen die Raumbelastung auf $4,3 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ und anschließend auf $4,5 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ erhöht, d.h. eine stoßweise Belastungssteigerung realisiert.

Die Gasmengenproduktion pro Tag bewegte sich im Bereich von 2000- 3000 l/Tag. Die gebildeten Fettsäuren stiegen bis zu 4000 mg/IACeq an. Der Methangehalt lag weitestgehend bei 45 Vol.-%, stieg aber zeitweise auf über 70 Vol.-%.

Die Erhöhung der Raumbelastung auf $6,3 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ erbrachte für den Zeitraum von 14 Tagen zufriedenstellende Ergebnisse bezogen auf die Gasproduktion und den Methangehalt, der weiterhin im Bereich 45 Vol.-% lag.

Ab dem 64. Versuchstag stieg der Säuregehalt über 10.000 mg/IACeq und weiter an. Eine Störung und Ungleichgewicht des Prozesses zeichnete sich ab. Der Methangehalt und die produzierte Gasvolumen sanken gegen Null. Der Prozess übersäuerte, was sich auch im pH-Wert widerspiegelte. Da ein abnehmender pH-Wert enorme Auswirkungen auf das biologische Milieu und die Mikroorganismen hat, wurde die Substratzufuhr gestoppt und die Raumbelastung auf Null herabgesetzt.

Die gestoppte Substratzufuhr resultierte in diesem hohen Säurebereich nicht mit einem Rückgang und Erholung der Biologie. Das Gleichgewicht im System konnte nicht wieder hergestellt werden, sodass der Fermenter geleert und neu beimpft werden musste.

Abbildung 4 zeigt den Versuchsverlauf nach Neubeimpfung des Fermenters. Die Raumbelastung wurde schrittweise von $1 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ auf $1,8 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ erhöht. Dabei pegelte sich der Methangehalt auf 50 Vol.-% ein. Die Gasproduktion variierte zwischen 600 und 1900 l/Tag. Die Säurewerte lagen im optimalen Bereich.

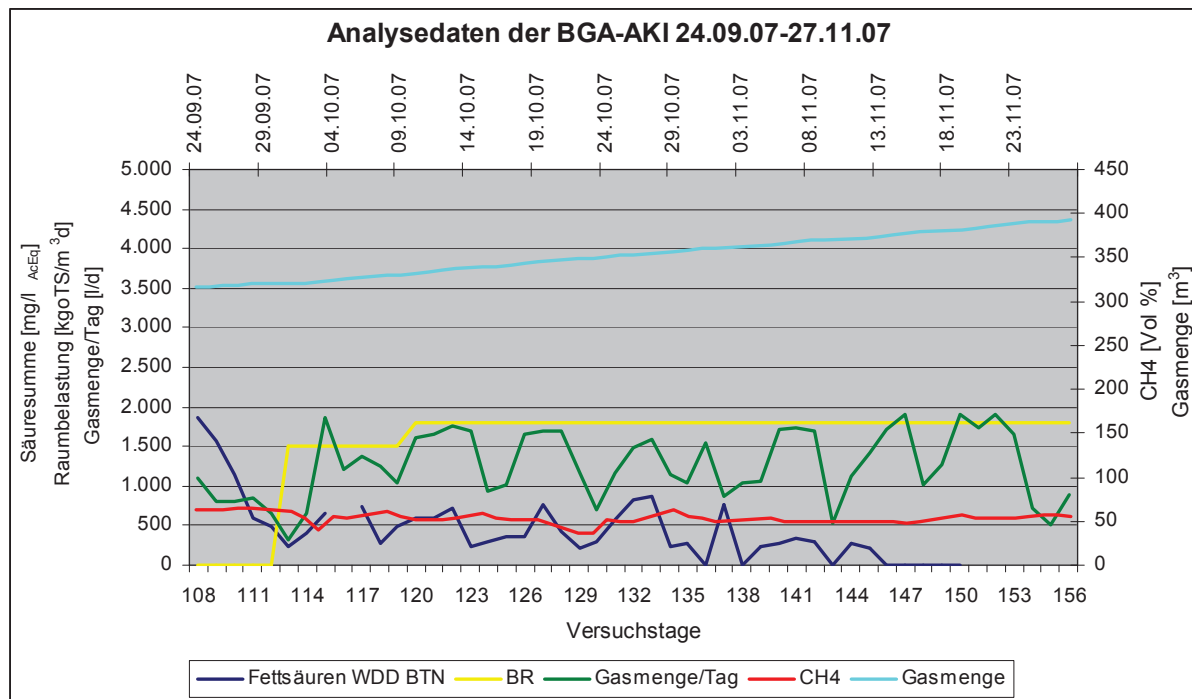


Abbildung 4: Analysedaten der Versuchsanlage 24.09.07 – 27.11.07

Betrachtung des Fettsäurespektrums in Abhängigkeit zur Raumbelastung

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde für den Zeitraum der kritischen Belastungssteigerung eine Vergleichsanalytik an der Fachhochschule Nordhausen durchgeführt. Durch detaillierte Konzentrationsangaben der im Gärprozess gebildeten Karbonsäuren und durch die Analyse des Gärsubstrates anhand der Ionenausschlusschromatographie sind somit genaue Aussagen zu den Auswirkungen gesteigerter Fermenterbelastungen auf den biologischen Prozess und Aktivität der Mikroorganismen möglich.

Die Abbildungen 8 bis 10 ermöglichen einen genaueren Einblick in die Zusammensetzung des Fettsäurenhaushaltes und das Fettsäurenmuster im Zeitraum der Belastungssteigerung. Aus Gründen der Übersichtlichkeit erfolgte eine Unterteilung des Zeitraumes in drei Abschnitte. Zu beachten ist, dass in den verschiedenen Diagrammen die Skalierung der Ordinatenachsen den Wertebereichen der Messergebnisse angepasst wurde, um diese entsprechend darstellen zu können.

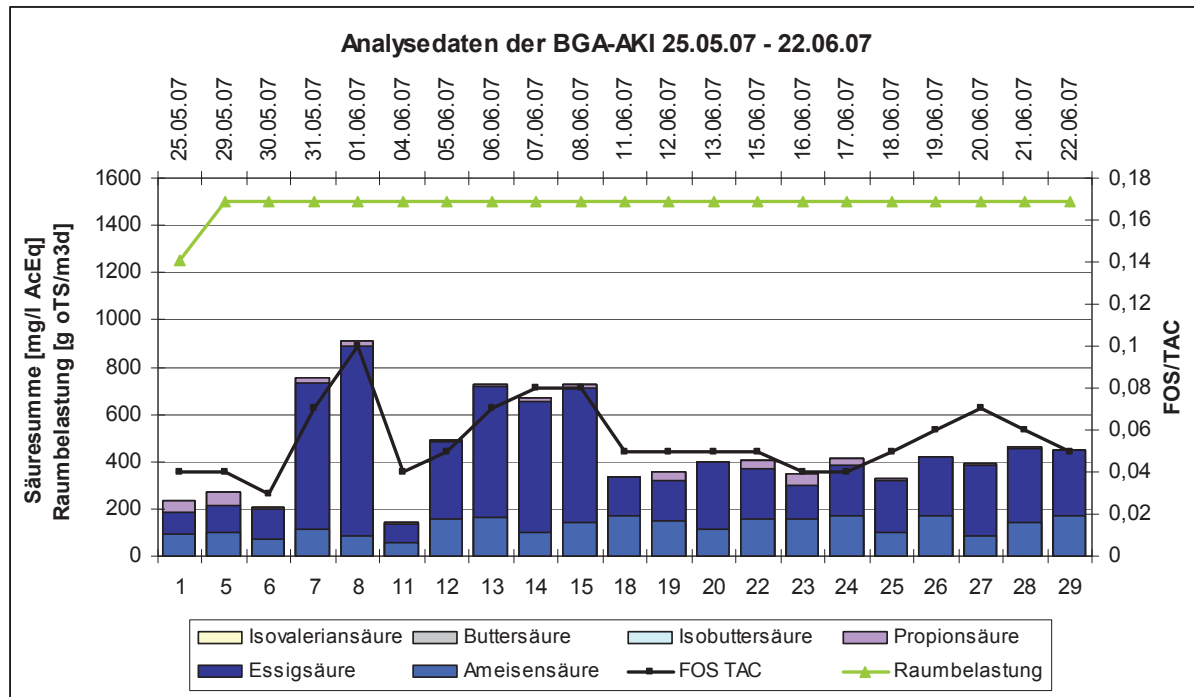


Abbildung 5: Fettsäuremuster vom 25.05.2007 - 22.06.2007

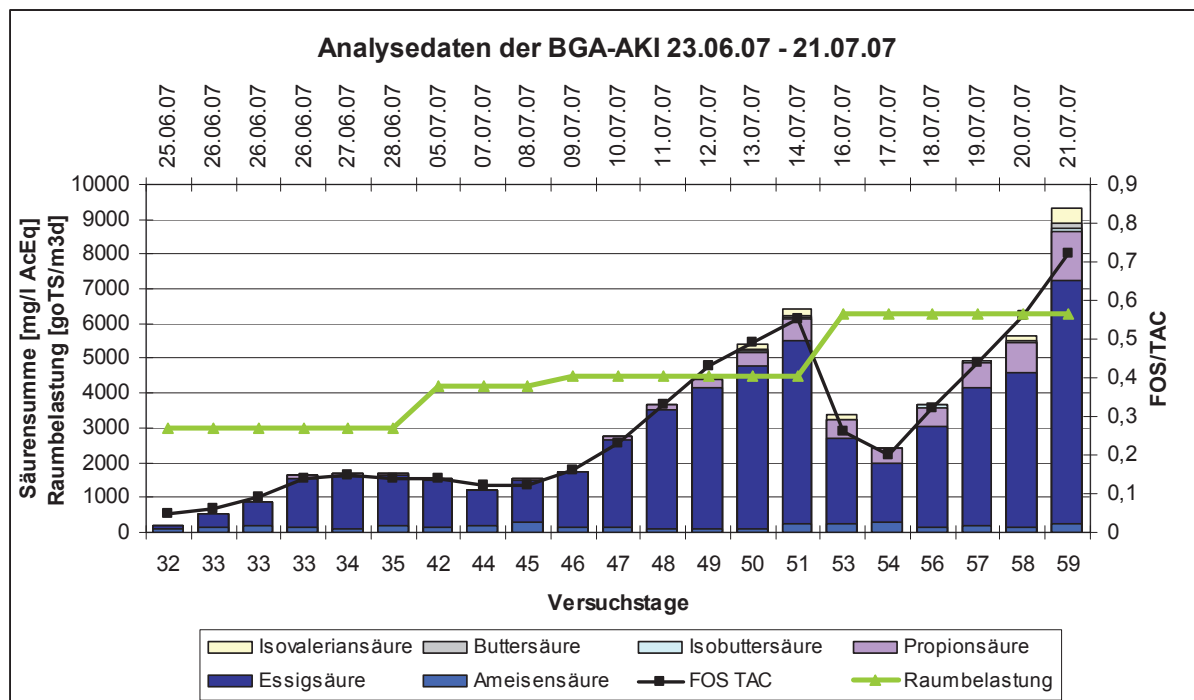


Abbildung 6: Fettsäuremuster vom 23.06.2007 - 21.07.2007

Die Diagramme der Abbildungen 5 bis 7 beschreiben neben dem Verlauf der Raumbelastung und dem FOS/TAC-Parameter, die Summe der organischen Fettsäuren in einem Säulendiagramm. Durch die ionenchromatographische Analyse besteht parallel zur Angabe

des Summenwertes der Säuren die Möglichkeit, die Konzentrationen der Einzelsubstanzen (verschieden farbig dargestellt) an organischen Fettsäuren zu bestimmen. Ermittelt wurden Ameisen-, Essig-, Propion-, Butter-, Isobutter- und Isovaleriansäure (C1-C5).

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass bei einer niedrigen Raumbelastung, wie in Abbildung 5, der Hauptbestandteil der organischen Fettsäuren Essigsäure ist. Die Werte der anderen, meist unerwünschten Säuren (Propion-, Butter-, Isobutter- und Isovaleriansäure) sind vernachlässigbar klein und liegen zwischen $< 5 \text{ mg/l}$ und 52 mg/l , genauso wie bei Ameisensäure mit Werten zwischen 39 mg/l und 174 mg/l .

Im Vergleich dazu ist in Abbildung 6 bei einer $BR \geq 3 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ überwiegend die Zunahme von Essigsäure, geringfügig aber auch die Zunahme von Propionsäure zu verzeichnen. Der Gehalt an Essigsäure steigt von ca. 92 mg/l auf ca. 4450 mg/l an. Die Werte der Propionsäure bewegen sich im Bereich von $< 5 \text{ mg/l}$ und 1427 mg/l . Weiterhin vernachlässigbar klein sind die Gehalte an Butter-, Isobutter-, Isovaleriansäure und Ameisensäure. Der verzeichnete Einbruch der kumulierten Fettsäuren bei Probe 43 und 44 (Versuchstag 53 und 54) ist das Resultat der fehlenden Substratzufuhr an den vorangegangenen Tagen.

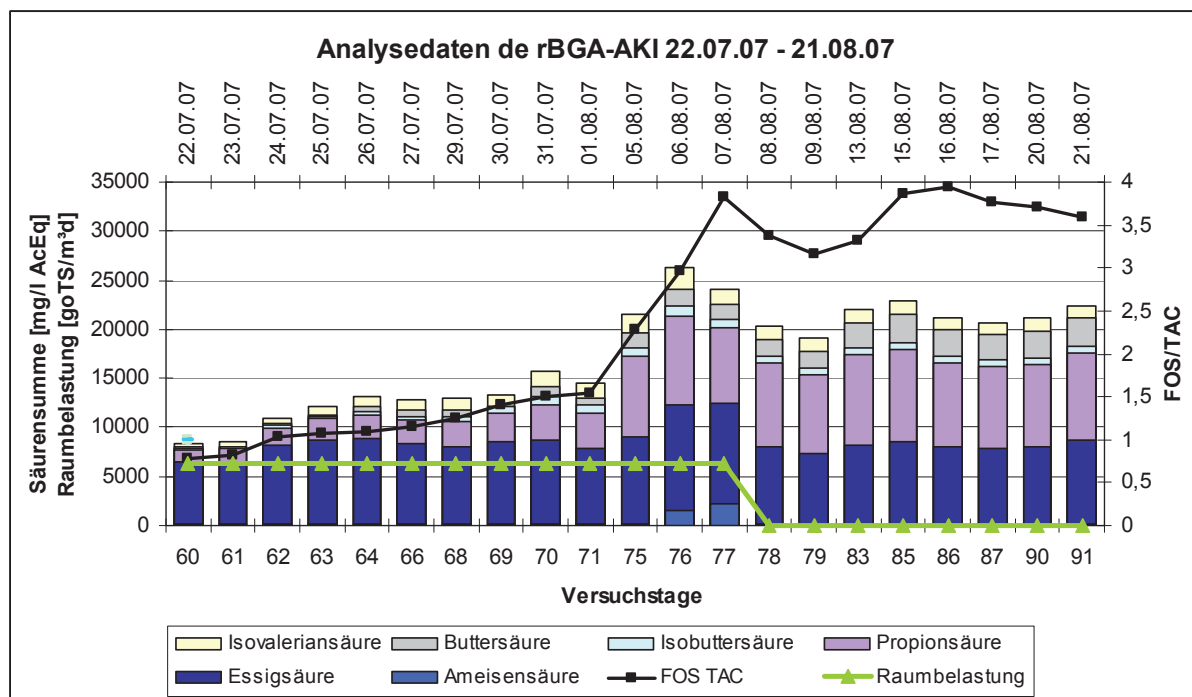


Abbildung 7: Fettsäuremuster vom 22.07.2007 - 21.08.2007

Der in Abbildung 7 dargestellte Zeitraum zeigt das Fettsäuremuster in der Phase der hohen Belastung und Übersäuerung. Die Gehalte an Essigsäure erreichen Werte von 6250 mg/l bis ca. 10.300 mg/l und werden begleitet von einem Anstieg der Propionsäure von ca. 1320 mg/l auf ca. 9170 mg/l . Das für eine optimale Fermentation empfohlene Verhältnis der Propion-

und Essigsäure von 1:5 wird überschritten, was sich in einem strengen Geruch der Proben, vor allem aber in der von diesem Zeitpunkt an kontinuierlichen Abnahme des Methangehaltes der Biogaszusammensetzung widerspiegelt. Weiterhin verdeutlichen die Messergebnisse der Fettsäurekonzentrationen in der Phase der Übersäuerung, dass nach der Reduzierung bzw. der vollständigen Einstellung der Substratzufuhr kein Rückgang der Gesamtsäurenschwere bzw. der Propionsäure zu verzeichnen ist. Bei Gesamtsummenwerten der Fettsäuren von ca. 26.200 mg/l liegen die Gehalte der Essigsäure bei rund 10.300 mg/l und der Propionsäure bei 9170 mg/l. Eine Regeneration der Biologie ist in vertretbaren Zeiträumen in diesem Bereich unwahrscheinlich. Die Auswirkungen der enormen Belastung mit einer BR von 6,3 kg oTS/(m³ *d), welche weit von dem empfohlenen Wert aus der Praxis abweicht, sind unmittelbar registrierbar.

1.4 Umbau der Versuchsanlage

Um eine automatisierte Prozessführung zu realisieren, musste die kleintechnische Versuchsanlage zwingend erneut umgebaut werden. Dies geschah im Zeitraum November 2007 bis März 2008, unmittelbar im Anschluss an die erste Versuchsreihe.

Der Umbau beinhaltete die Erweiterung des Rohrleitungssystems vom Auffangbehälter über den Vorratsbehälter zur Saugseite der Substratpumpe mit zusätzlichem Einbau eines Absperrventils, sodass nach der Beschickung Medium zurückgepumpt werden konnte. Der Betrieb wurde somit von einer manuellen Substratzugabe ohne Rückpumpen zur automatischen Substratzugabe mit Rückpumpen überführt. Das Rückpumpen von vergorenem Medium erforderte den zusätzlichen Einbau eines Rührwerkes in den Auffangbehälter zum Zwecke der gleichmäßigen Durchmischung des Behälterinhaltes sowie den Einbau von Füllstandsmessgeräten im Auffang- und Vorlagebehälter zum Zwecke der genauen Dosierung. Zeitgleich wurden die seit der Erweiterung der Anlage zur Redoxpotential- und pH-Wertmessung eingesetzten Sonden gereinigt und kalibriert.

Der aus Edelstahl bestehende Fermenter sowie der zur Temperierung des Fermenters verwendete Wärmetauscher konnte während der Bauphase der kleintechnischen Versuchsanlage aus Kostengründen nicht isoliert werden. Die permanente Wärmeleitung beider Bauteile nach außen führte zur übermäßigen Aufheizung der Raumtemperatur und dauerhaften Strapazierung der Belüftungsanlage der wärmeempfindlichen SPS-Einheit. Der aus einer Nichtisolation resultierende hohe Wärmeverlust zog einen unverhältnismäßigen Mehraufwand für die Konstanthaltung der Versuchstemperatur auf 38°C nach sich. Aus den genannten energetischen Gründen sowie zur Leistungssteigerung der Kondensatfalle (Gastrocknung) und

der daraus resultierenden Schonung des Gasanalysegerätes wurde sowohl der Fermenter als auch der Wärmetauscher mit einer Isolationsschicht versehen.

Die genannten Maßnahmen waren Grundvoraussetzung für das zu installierende Fuzzy-Regelsystem und sind in Abbildung 8, Seite 28 als Fließschema dargestellt.

Die Erfassung der Daten von der Versuchsanlage (Speicherung in ACCESS-Datenbank, Visualisierung mit LabVIEW im Daten-Logger und Monitor) auf den Prozessleitrechner sowie die Übertragung der aktuellen Daten per Internet zum Projektpartner wurde entsprechend erweitert/angepasst und auf den Zeit-Takt 1 Stunde geändert. Das Fuzzy-Regelsystem wurde in LabVIEW programmiert und über eine Schnittstelle im Prozessleitrechner an die Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) angekoppelt. Die Datenbank, die Visualisierung und der Daten-Logger wurden entsprechend erweitert, ebenso das C-Programm für den Daten-Transfer über das Internet.

Tabelle 4: Umbaumaßnahmen

Biogasanlage	Umbaumaßnahmen	Wirkung
	Erweiterung des Rohrleitungssystems und Einbau Absperrventil	automatisches Rückpumpen von Medium vom Auffangbehälter zum Vorlagebehälter
	Einbau eines Rührwerks in den Auffangbehälter	Durchmischung des Inhaltes, Zerstörung und Vermeidung von Schwimm- und Sinkschichten
	Einbau von Füllstandsmessgeräten in Auffangbehälter	Kontrolle des Füllstandes im Auffangbehälter
	Austausch des Füllstandssensors im Vorlagebehälter	Messung der Füllstandshöhe im Vorlagebehälter
	Isolierung des Fermenters und des Wärmetauschers	Wärmedämmung und Energieeinsparung, Schutz der wärmeempfindlichen SPS-Einheit

1.5 Testphase

Nach Abschluss der Umbauarbeiten an der Versuchsanlage erfolgte im Zeitraum 01. bis 25.05.2008 eine Test- und Anfahrphase. In diesem Rahmen wurde der Fermenter am 12.03.2008 mit 1300 Litern vergorener Schweinegülle neu beimpft und mit 0,5 bis 2,0 kg oTS Triticale pro Tag beschickt. Während der Testphase kam es zu mehreren beeinträchtigenden gerätetechnischen Defekten, so dass sich der Start der neuen Versuchsreihe bis zum 26.05.08 hinauszögerte.

Am 13.03.2008 fiel die Gastherme aus, welches einen starken Abfall der Fermentertemperatur (von 38°C auf Raumtemperatur) nach sich zog. Ze itgleich kam es durch einen Defekt in der Kondensatfalle zur verminderten Gastrocknung mit darauffolgender Vernässung des Gaszählers. Beide Geräte mussten gewartet werden. Am 19.03.08 erfolgten Kalibrierungsarbeiten an den Messsonden. Der Defekt der Kondensatfalle führte wenig später zum Ausfall des Biogascontrollers, welches Wartungsarbeiten erforderlich machte. Die Gastherme fiel im Zeitraum vom 08.05.2008 bis 12.05.2008 erneut aus und führte zur wiederholten Verminderung der Fermentertemperatur vom 38°C auf Raumtemperatur.

Auf eine Darstellung der Prozessparameter wird an dieser Stelle aufgrund der obig genannten Störungen und Defekte verzichtet.

Am 10. April 2008 erfolgte die Realisierung der Online-Datenübertragung zum Projektpartner nach Hamburg. Fortan standen dem Projektpartner die Parameter Temperatur, pH-Wert, Redoxpotential, CH₄, CO₂, O₂, H₂S, GPR im 10-Minuten-Takt, später stündlich zur Verfügung. Die Messwerte wurden kontinuierlich gespeichert und ausgewertet.

1.6 Versuchsreihe II

Zeitraum 26.05.2008 – 19.08.2008 (1.- 86. Versuchstag)

Am 26.05.2008 startete die zweite Versuchsreihe. Zu Beginn wurden Vorlage- und Auffangbehälter mit je 500 Liter Wasser gefüllt. Wie bereits in der Testphase wurde die Versuchsanlage automatisiert mit Triticalen beschickt. Die Beschickung erfolgte jetzt alle 8 Stunden (7:00, 15:00, 23:00 Uhr) mit jeweils ca. 50 Litern Medium (Substrat und Wasser) aus dem Vorlagebehälter in den Fermenter (Vgl. Versuchsreihe I: 1x täglich Beschickung). Damit der Prozess stabil blieb, wurde jetzt täglich Medium aus dem Auffangbehälter zurückgepumpt sowie 20 Liter Medium abgelassen, entsprechend der Vorgehensweise bei einer großtechnischen Anlage. Die Raumbelastung wurde zunächst vom 1. bis zum 74. Versuchstag konstant bei 1,5 kg oTS/(m³ *d) gehalten, um ein stabiles Fermentermilieu zu erreichen.

Eine Steigerung auf 2,0 kg oTS/(m³ *d) erfolgte ab dem 75. Versuchstag. Ein erneuter Defekt des Biogascontrollers BC20 verursachte die niedrigen CH₄-Gehalte vom 3. bis 30. Versuchstag, die für diesen Zeitraum realistisch zwischen 55 und 65 % lagen.

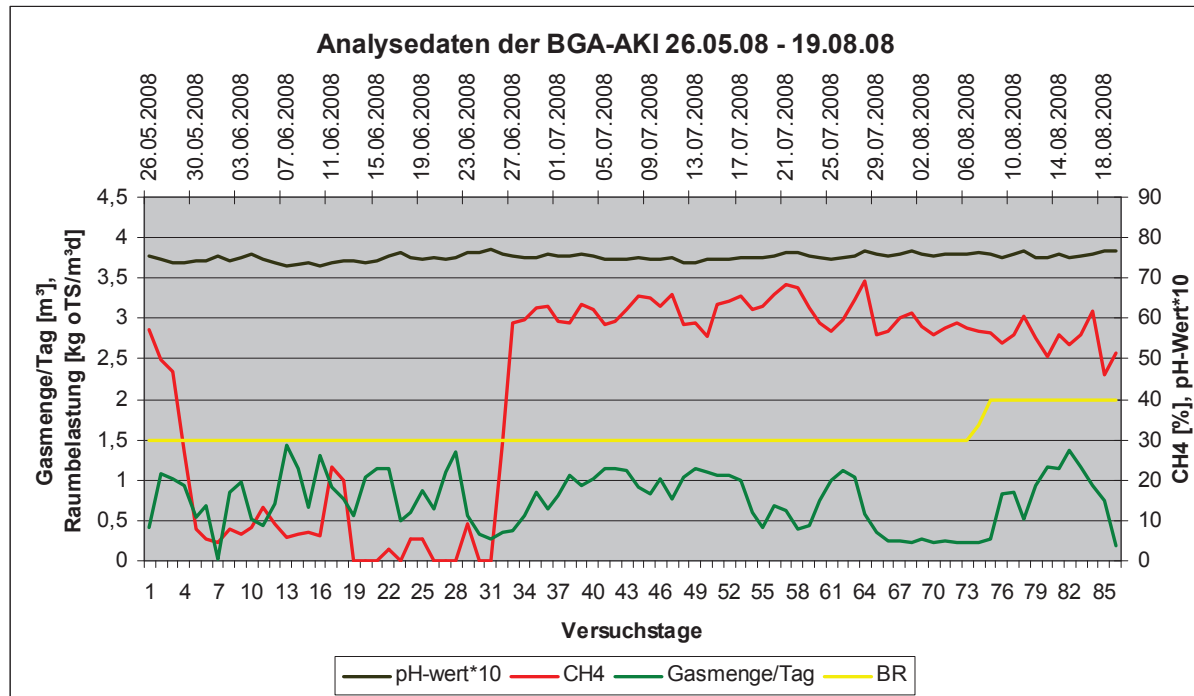


Abbildung 9: Analysedaten der Versuchsanlage 26.05.08 - 19.08.08

Ausgehend von Richtwerten kann bei der Vergärung von Triticale mit einem Methangehalt von ca. 50 – 55 % gerechnet werden. In Abbildung 9 und folgend sind Methangehalte um 60 % bis 65 % ersichtlich. Durch das Anmischen von Triticale, Wasser und Recyclat im Vorlagebehälter, bedingt durch den automatisierten Beschickungsvorgang, kommt es zum einsetzen einer Hydrolysestufe im Vorlagebehälter, mit daraus resultierenden höheren Methangehalten im Biogas.

Im Zeitraum 27.06.08 bis 19.08.09 liegt der Mittelwert der Methanausbeute bei 58 %.

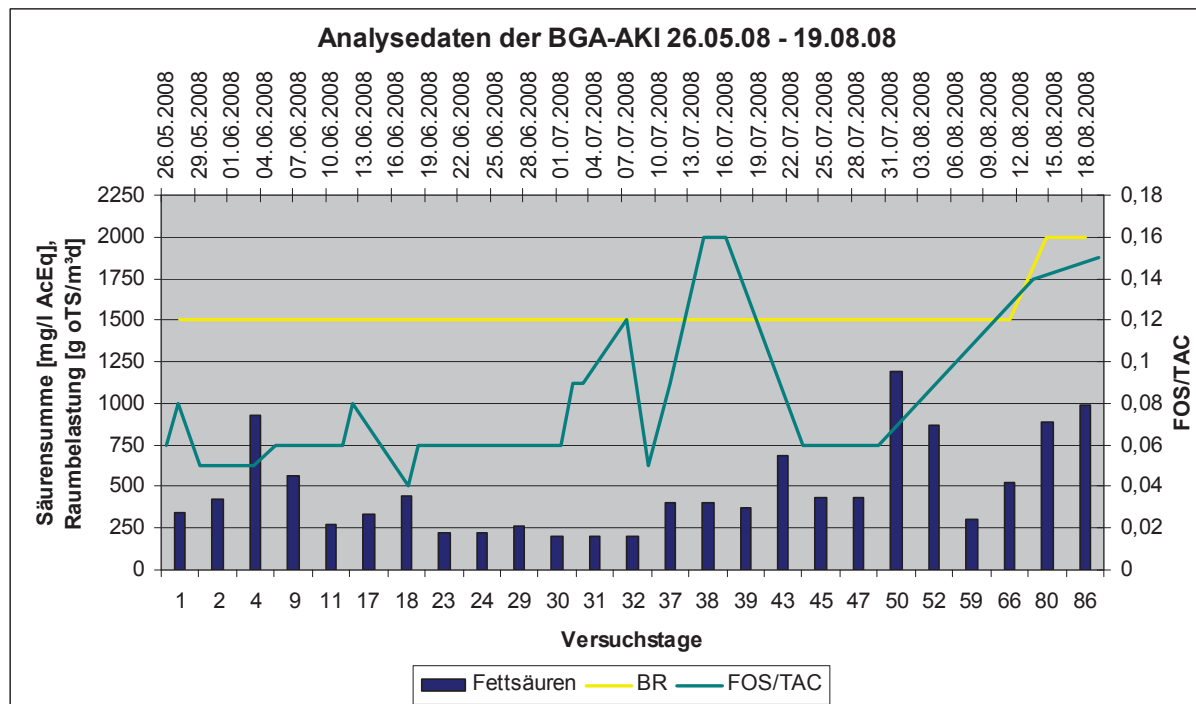


Abbildung 10: Analysedaten der Versuchsanlage 26.05.08 - 19.08.08

Durch die Erhöhung der Anzahl der Beschickungen von stoßweise täglich einer Beschickung in Versuchsreihe I auf täglich drei Beschickungen im 8-Stunden-Takt wurde ein gleichförmiger Verlauf aller Prozessparameter erreicht. Das zeitweise Ansteigen der Säuregehalte und der darauf folgende Abfall (siehe Abbildung 10) liegen in der wochenendbedingten ausgesetzten Beschickung begründet.

Bis zur Aktivierung der Fuzzy-Logikregelung am 23.10.2008 wurde die Beschickung der kleintechnischen Versuchsbiogasanlage bei 1,5 kg oTS/(m³ *d) konstant gehalten. Die Prozessparameter pH-Wert, CH₄-Gehalt und täglich produzierte Gasmenge sind der Raumbelastung in Abbildung 11, Seite 32 gegenübergestellt.

Im Zeitraum 101. – 104. (06.-09.09.2008) Versuchstag kam es zu einer Störung im Anlagenbetrieb mit daraus resultierender Einstellung der automatisierten Beschickung.

Aus der Betrachtung der Prozess- und Analyseparameter kann zum Zeitpunkt der Aktivierung der Fuzzy-Logikregelung von einem stabilen Fermenterprozess ausgegangen werden.

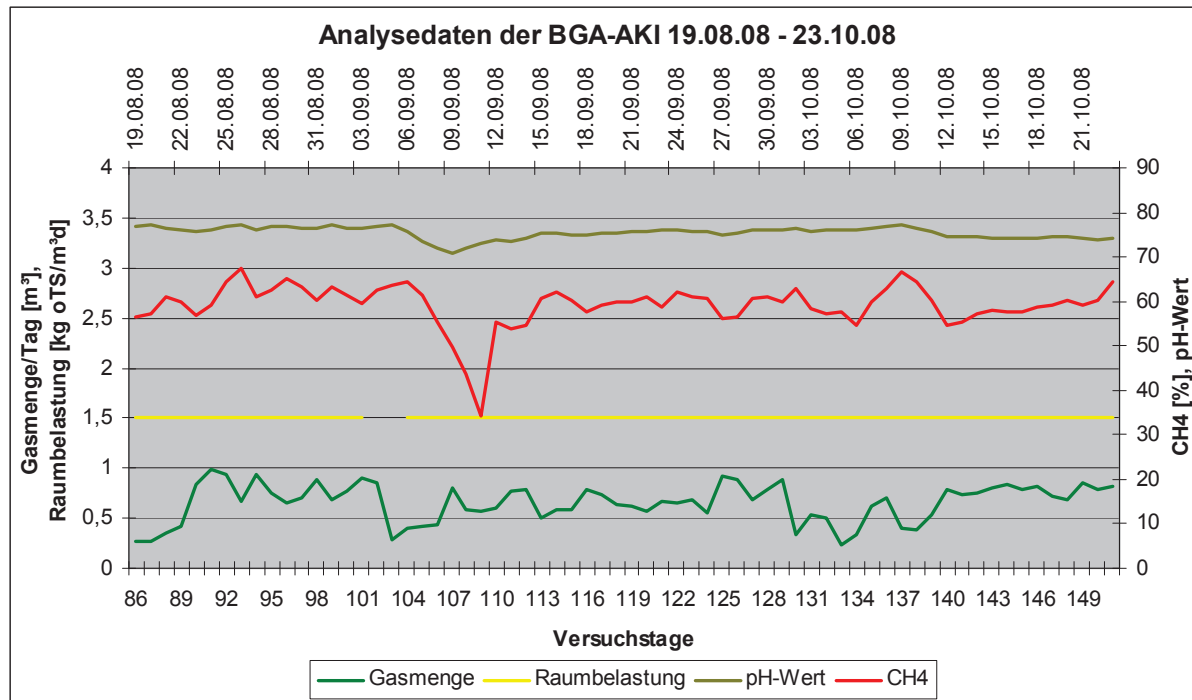


Abbildung 11: Analysedaten der Versuchsbiogasanlage 19.08.08 - 23.10.08

Betrieb der Versuchsanlage per Fuzzy-Logikregelung

Grundlagen und Methoden der Fuzzy-Logikregelung

Problemstellung

Ziel des Projekts war die Realisierung einer automatischen Steuerung der Biogasanlage auf der Basis einer Fuzzy-Logikregelung, welche 1998 - 2001 an der HAW Hamburg in einem DBU-Projekt für Speisereste (Modellsubstrat „Katzenfutter“) entwickelt und im Labor getestet wurde (Abdul-Kholiq und Scherer 2002). Später kam die Regelung für saure Rübensilage hinzu, die im Labor der HAW von 2003 bis jetzt im Einsatz ist. Es war a priori nicht klar, ob diese Fuzzy-Logikregelung implementiert auf dem Prozessleitrechner der kleintechnischen Versuchsbiogasanlage der Fachhochschule Nordhausen mit einem Reaktorvolumen von 1 m³ ohne wesentliche Korrekturen funktioniert.

Fragen:

- i) Bestimmen die aktuellen Werte von (GPR, CH₄, pH) den Prozessverlauf hinreichend und kann man diesen über die Beschickungsmenge OLR (organic loading rate) steuern?
- ii) Ist das mit der gegebenen Fuzzy-Regelung (je Regelparameter spezGPR, pH, CH₄ je 3 trapezförmige Fuzzy-Mengen mit dem Ansatz $OLR_{neu} = z \cdot OLR$ realisierbar, bei (spezGPR, CH₄, pH) und $spezGPR = GPR/OLR$?

- iii) Bleibt der Prozess auch bei hohem Durchsatz durch die Fuzzy-Logikregelung kontrollierbar? Die in den Versuchsreihen mit manueller und automatischer Beschickung Mai 2007 bis zum Oktober 2008 gewonnenen Erfahrungen ließen vermuten, dass der kritische Wert für die im Reaktor abbaubare Futtermenge vielleicht bei $OLR \approx 5 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ liegt. Wie reagiert die Regelung bei höheren Werten?

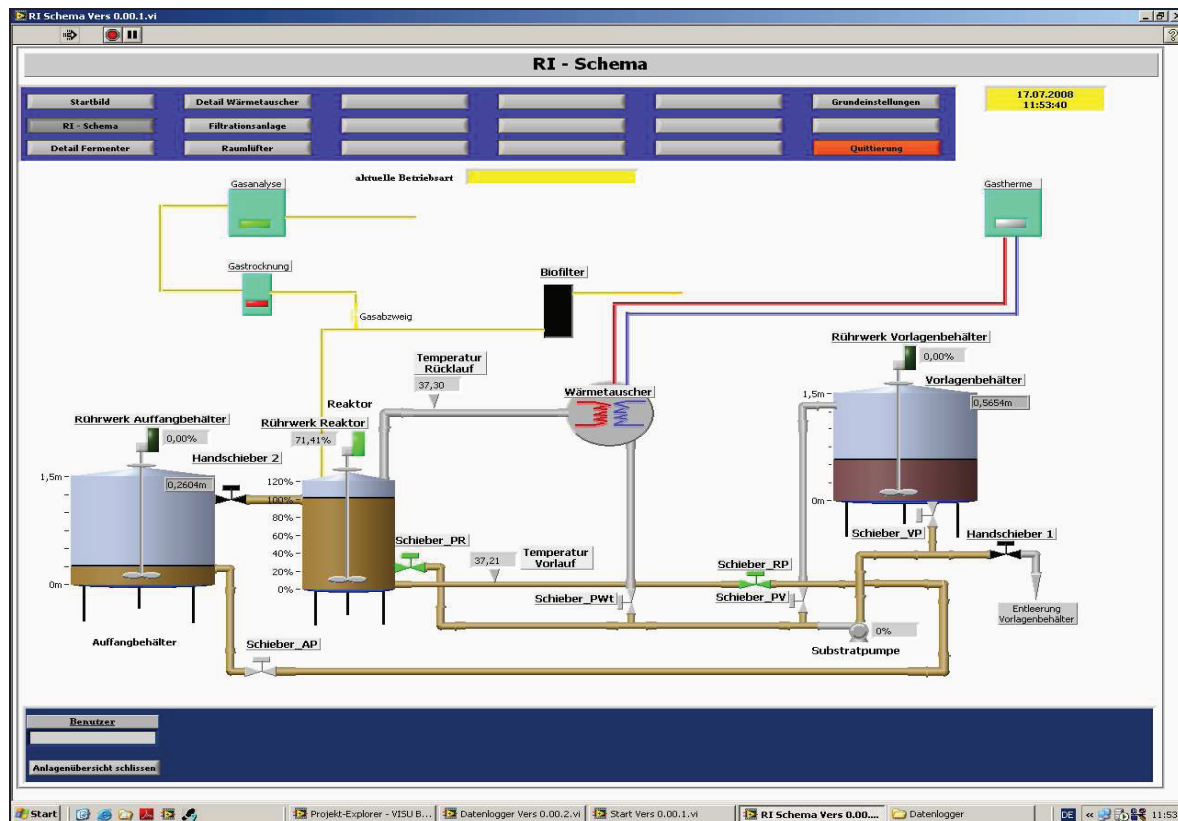


Abbildung 12: Visualisierung: Flussbild BGA 2008 (unter LabVIEW konzipiert)

Die Ausführungen zur Fuzzy Logikregelung finden sich im Abschlussbericht des Projektpartners HAW Hamburg. Es folgen die Ergebnisse zur Biogasanlage im AKI der FHN.

Zeitraum 23.10.2008 – 31.12.2008 (87. – 220. Versuchstag)

Am 23.10.2008 wurde die angepasste Fuzzy-Logikregelung installiert und aktiviert. Die Anlage wurde nun vollautomatisch per Fuzzy-Logikregelung geregelt. Das LabVIEW – Programm ermittelt jeweils 30 Minuten vor jeder Beschickung aus den aktuellen Daten Gasproduktionsrate (GPR), pH-Wert und CH_4 -Gehalt sowie der letzten OLR zunächst die spezifische Gasausbeute (spezGPR) am Tag und anschließend die neue Beschickungsmenge pro Tag (OLRneu). Die Anzahl der Substratzugaben erfolgte 3 x täglich.

Nach der Inbetriebnahme der Fuzzy-Logikregelung am 151. Versuchstag regelte diese die Beschickungsmenge pro Tag auf 1,5 kg oTS/m³. Aufgrund des Fermentervolumens von 1 m³ ist die tägliche Beschickungsmenge (OLR) der in den nachstehenden Diagrammen aufgeführten Raumbelastung (BR) gleichzusetzen. Am 26.11.2008 stieg die tägl. Beschickungsmenge, wie in Abbildung 13, Seite 34 ersichtlich, bis zum 197. Versuchstag schrittweise auf 2,6 kg oTS/(m³ *d) an. Die darauf folgende starke Minimierung der Beschickungsmenge durch die Regelung ergab sich aus der Negativbewertung der drei Regelungsgrößen pH-Wert, GPR und CH₄-Gehalt. Mit dem Anstieg der Regelungsgrößen, der daraus resultierenden Positivbewertung und der 1. Korrektur der Fuzzy-Logikregelung (K1) kam es am 200. Versuchstag zum erneuten Anstieg der ORL.

Am 203. Versuchstag erfolgte nach obig beschriebenem Bewertungsvorgang eine erneute drastische Minimierung der tägl. Beschickungsmenge bis auf 300 g oTS/(m³ *d) mit anschließender schneller Steigerung. Diese Intervalle sind bis zum 211. Versuchstag zu beobachten. Aufgrund der hochschulinternen Winterpause wurden vom 23. Dezember 2008 die Beschickung und die Temperierung des Fermenters bis zum 05.01.2009 eingestellt, woraus der starke Abfall des Methangehaltes und der täglich produzierten Gasmenge resultiert.

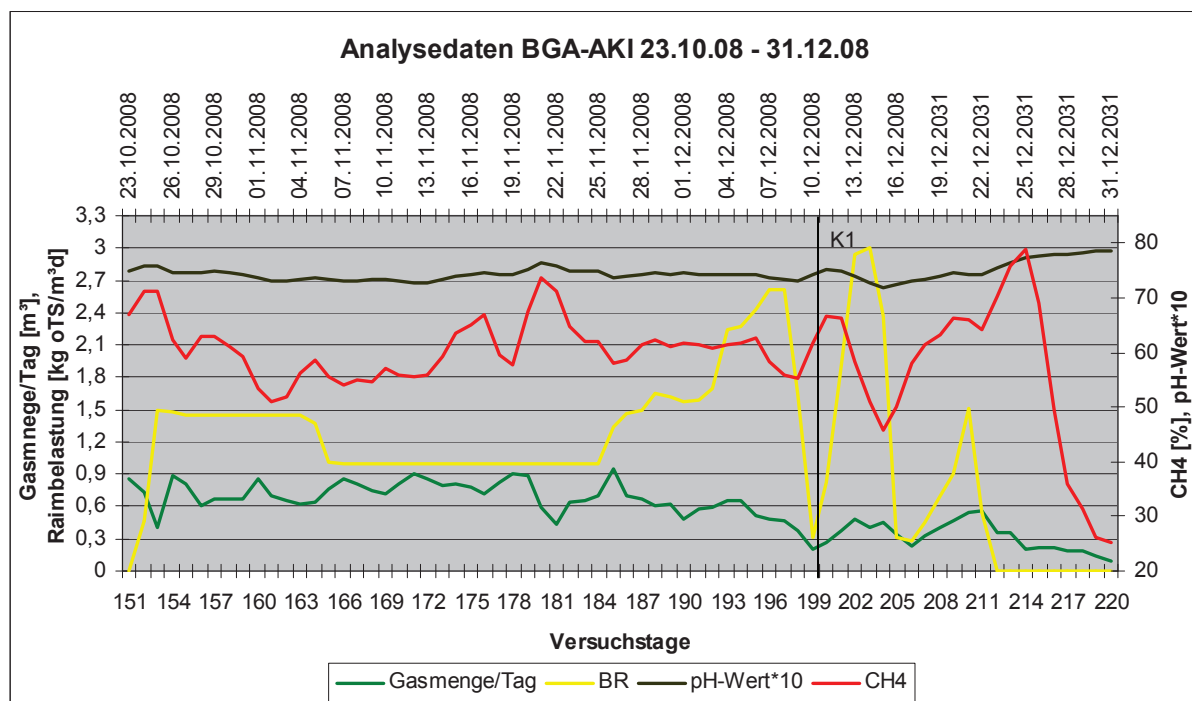


Abbildung 13: Analysedaten der Versuchsanlage 23.10.2008 - 31.12.2008

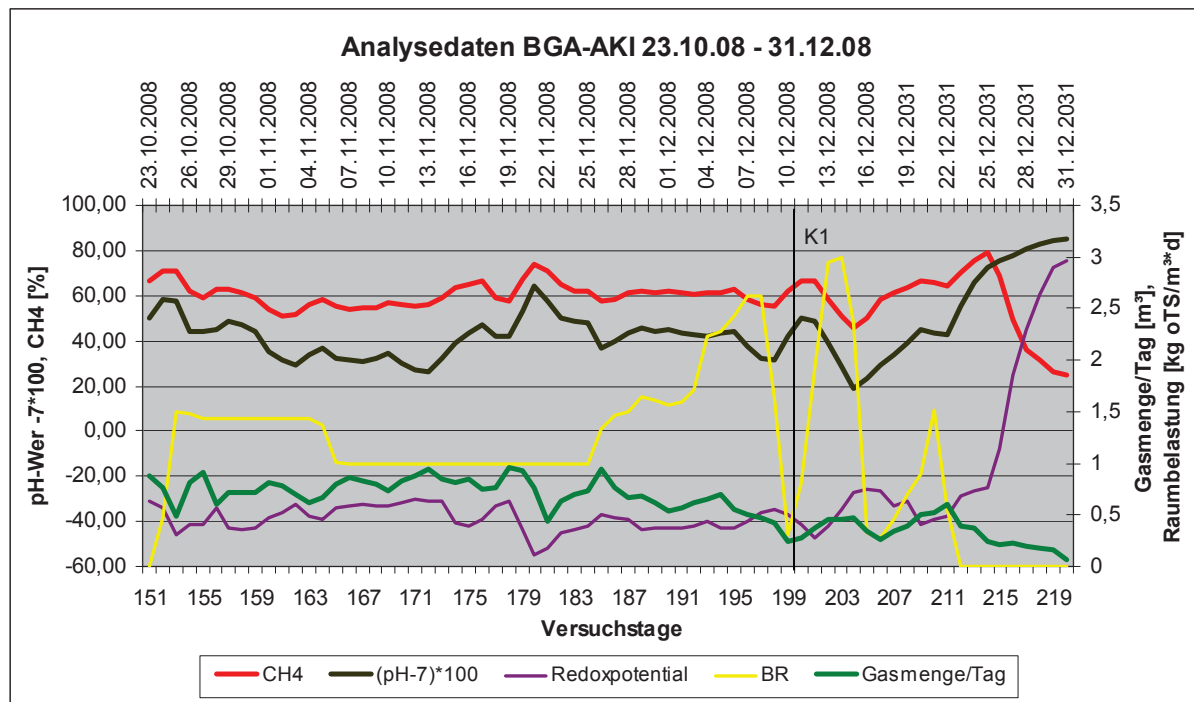


Abbildung 14: Analysedaten BGA-AKI 23.10.08 - 31.12.08

Abbildung 14 veranschaulicht ähnlich wie Abbildung 13 die Prozessparameter der Versuchsanlage im Zeitraum 23.10.2008 bis 31.12.2008. Jedoch wurde hier eine andere Skalierung für die Darstellung des pH-Wertes gewählt, sodass hier die Nachkommastellen genauer betrachtet werden können. Dadurch wird eine deutliche Korrelation zwischen pH-Wert und Methangehalt erkennbar. Beide Kurvenverläufe sind zeitlich identisch, sodass man von einer positiven Korrelation sprechen kann. Auch die Gasmenge/Tag weist einen Zusammenhang zum pH-Wert und Methangehalt auf. Der Kurvenverlauf der Gasmenge/Tag ist jedoch entgegengesetzt zum pH-Wert und Methangehalt. Es handelt sich um eine negative Korrelation.

Abbildung 15 zeigt den Verlauf der Säuregehalte und des FOS/TAC in der Gegenüberstellung der Raumbelastung. Die Fettsäurewerte in Summe sowie auch der FOS/TAC lagen für den Zeitraum im stabilen Bereich.

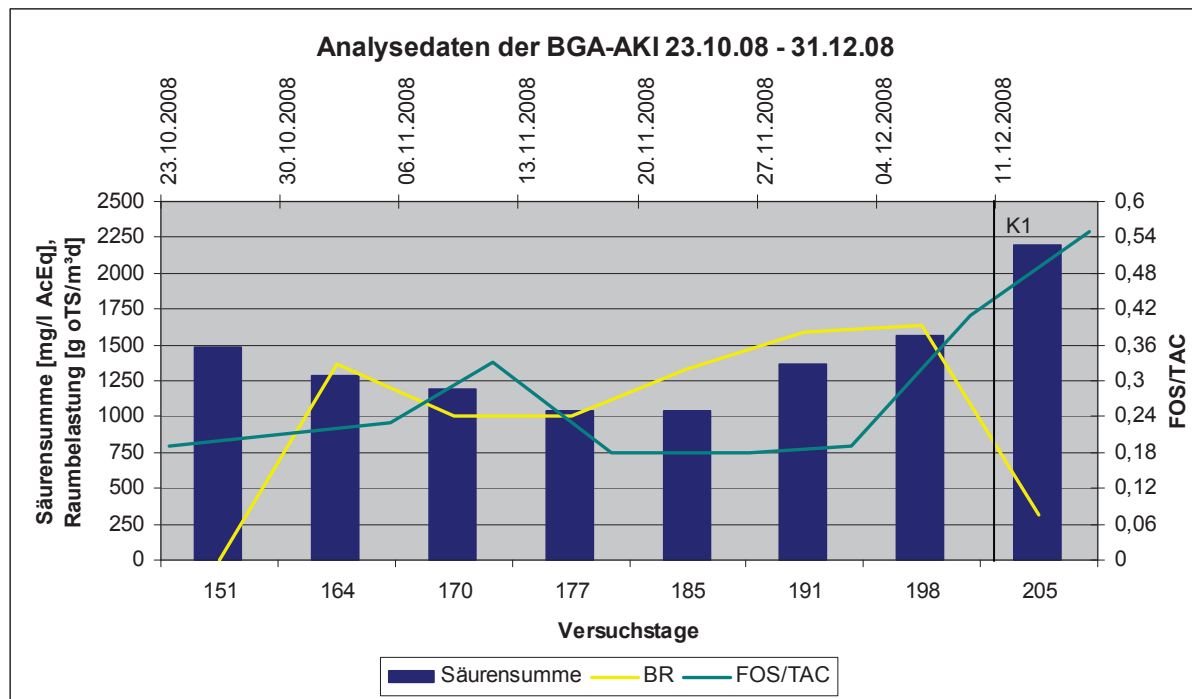


Abbildung 15: Analysedaten der Versuchsanlage 23.10.2008 - 31.12.2008

Zeitraum 01.01.2009 – 31.03.2009 (221. – 310. Versuchstag)

Im Anschluss an die jahreswechselbedingte Winterpause wurde am 6. Januar 2009 (225. Versuchstag) die Beheizung der Biogasanlage wieder aufgenommen. Die Beschickung der Anlage erfolgte aufgrund eines gewollten langsamen Wiederauffahrens bis zum 247. Versuchstag manuell mit zunächst 0,3 kg oTS/(m³ *d) und steigend. Die Fuzzy-Logikregelung kam ab dem 248. Versuchstag mit einer Begrenzung der täglichen Beladung von minimal 0,1 kg oTS/(m³ *d) und maximal 2,5 kg oTS/(m³ *d) wieder zum Tragen. Die Beschickung erfolgte 3 x täglich (7:00, 15:00, 23:00 Uhr). Die Befüllung des Vorlagebehälters mit Triticalen erfolgte 2 x wöchentlich unter Rückpumpen von Medium aus dem Auffang- in den Vorlagebehälter sodass sich eine Konzentration (C_{oTS}) von 1 kg oTS pro 100 Liter ergab. Die tägliche Beladungsmenge wurde durch die Fuzzy-Logikregelung ab dem Zeitpunkt der Reaktivierung schrittweise erhöht (Abbildung 16, Seite 37). Am 04.03.09 (283. Versuchstag) wurde die im Fermenter installierte pH-Sonde aufgrund eines lebenszeitlichen Defekts erneuert. Bedingt durch den Sondenaustausch, mit einem daraus resultierenden niedrigeren gemessenen pH-Wert, korrigierte die Regelung die tägliche Beladungsmenge fehlgeleitet nach unten. Deren Stagnation bei durchschnittlich 0,5 kg oTS/(m³ *d) erforderte eine erneute 2. Korrektur (K2) der Fuzzy-Logikregelung.

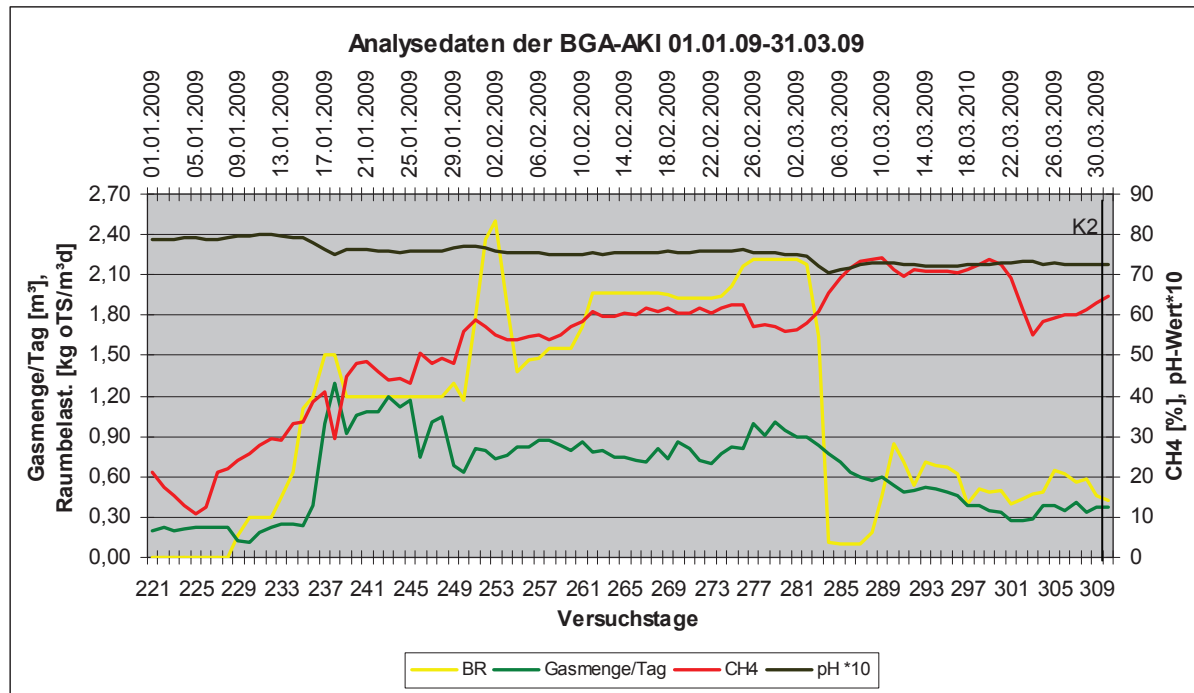


Abbildung 16: Analysedaten der BGA-AKI 01.01.09 - 31.03.09

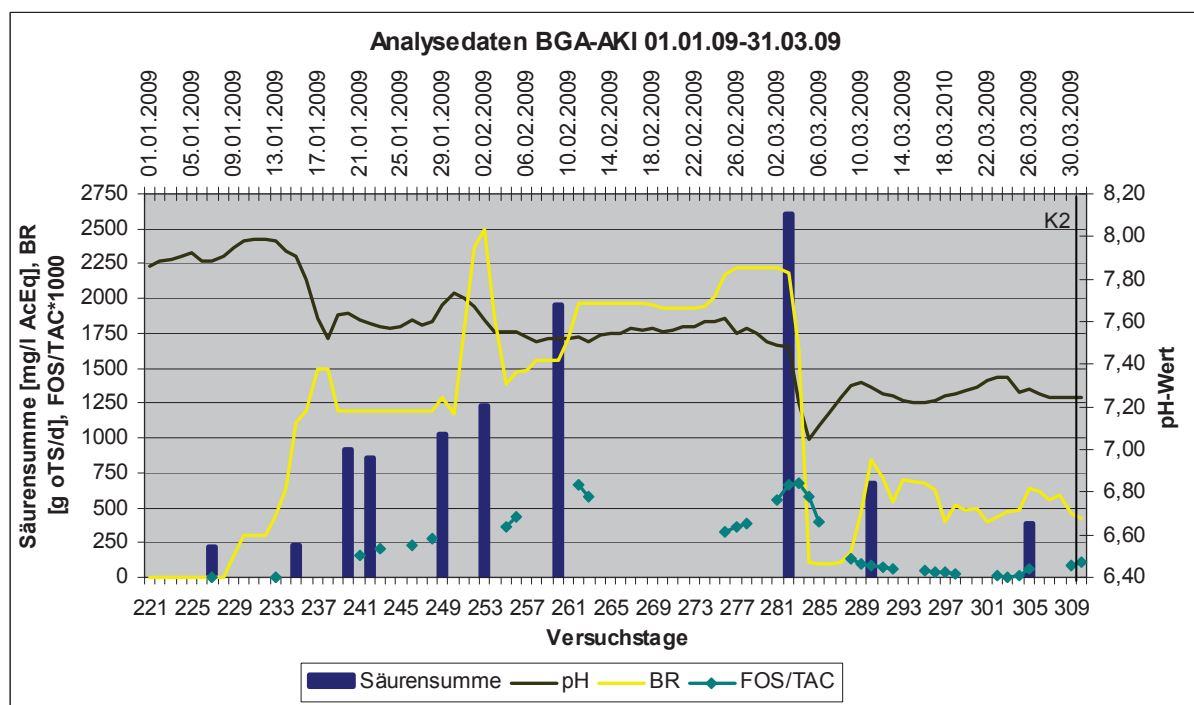


Abbildung 17: Analysedaten der Versuchsanlage 01.01.09 - 31.03.09

Zeitraum 01.04.2009 bis 30.06.2009 (311. – 401. Versuchstag)

Im Zeitraum zwischen dem 314. und 338. Versuchstag stellte sich eine Verschlechterung der täglich produzierten Gasmenge mit zeitgleichem starkem Anstieg der Fettsäurewerte und Absinken des pH-Wertes ein. Diese Kombination deutete auf eine mögliche Versäuerung,

spricht ein „Kippen“ des Fermenter hin. Am 28.04.2009 (338. Versuchstag) wurde aus diesen Gründen die Fuzzy-Logikregelung außer Betrieb genommen und die Beschickung für 7 Tage ausgesetzt. Diese bewusste „Fastenkur“ der Bakterien bewirkte einen Rückgang der Konzentration an wasserdampfgefährlichen Säuren (siehe Abbildung 19). Ab dem 345. Versuchstag erfolgte dann zunächst die manuelle Beschickung mit täglich 2 kg oTS/m³ aufgeteilt in zwei Beschickungsraten. Das Anmischen der Triticale im Vorlagebehälter wurde angepasst und erfolgte nun im Verhältnis 1 Teil Triticale zu 2 Teile Wasser unter Rückpumpen von Medium aus dem Auffangbehälter zur Gewährleistung der Pumpfähigkeit des Substrates. Wochenendbedingt wurde die manuelle Beschickung ausgesetzt, welches zu einem peakgeprägten Kurvenverlauf der Raumbelastung in Abbildung 18 und Abbildung 19 führte.

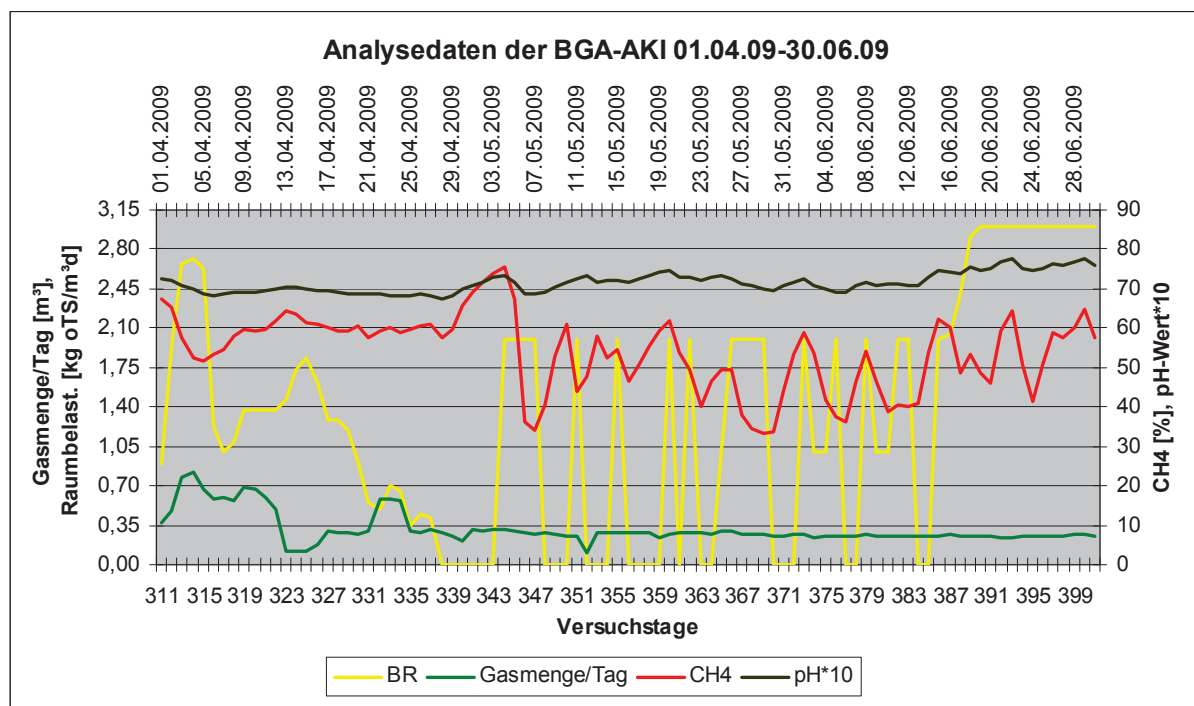


Abbildung 18: Analysedaten Versuchsanlage 01.04.09 - 30.06.09

Der pH-Wert stieg nach dem kurzzeitigen Beschickungsstopp und den wochenendbedingten Beschickungspausen deutlich an. Dennoch kam es zu keiner Steigerung der täglich produzierten Gasmenge. (Vgl. Abbildung 18, Abbildung 19)

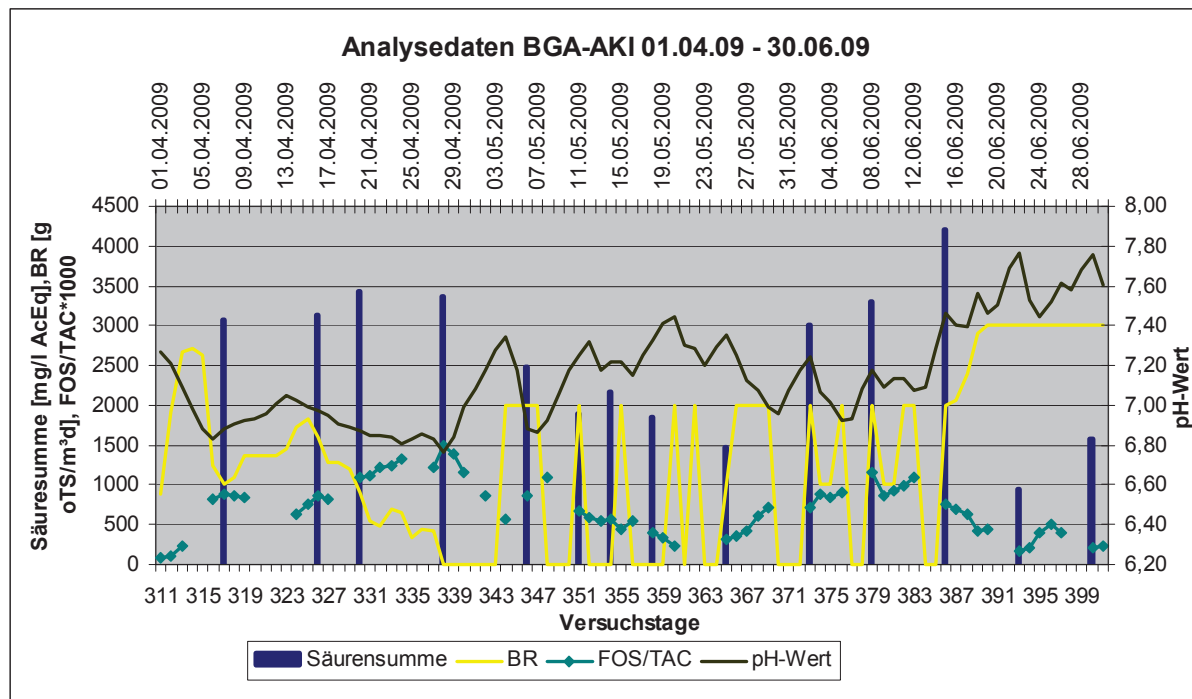


Abbildung 19: Analysedaten Versuchsanlage 01.04.09 - 30.06.09

Die vom Projektpartner HAW Hamburg am 22.04.2009 und 28.05.2009 durchgeführten digitalen Bildanalysen der mikrobiellen Population im Fermenter der Versuchsanlage ergab eine extreme Minimierung der bakteriellen Gesamtpopulation und der methanbildenden Bakterien im Vergleich zu vorangegangenen Untersuchungen mit nachstehenden Ergebnissen.

Gesamtzahl (GZ) **28.8.2008**
Methanbildner (MB)

$2,6 \times 10^{10}/\text{ml}$
 $2,3 \times 10^9/\text{ml} = 8,8 \%$

Gesamtzahl (GZ) **22.4.2009**
Methanbildner (MB)

$9,3 \times 10^9/\text{ml}$ (36 % vom 28.8.2008)
 $9,2 \times 10^8/\text{ml} = 9,8 \%$ (40% des Wertes vom 28.8.2008)

Gesamtzahl (GZ) **28.5.2009**
Methanbildner (MB)

$9,4 \times 10^9/\text{ml}$ (36 % vom 28.8.2008)
 $2,4 \times 10^8/\text{ml} = 2,6 \%$ (10,4 % vom 28.8.2008)

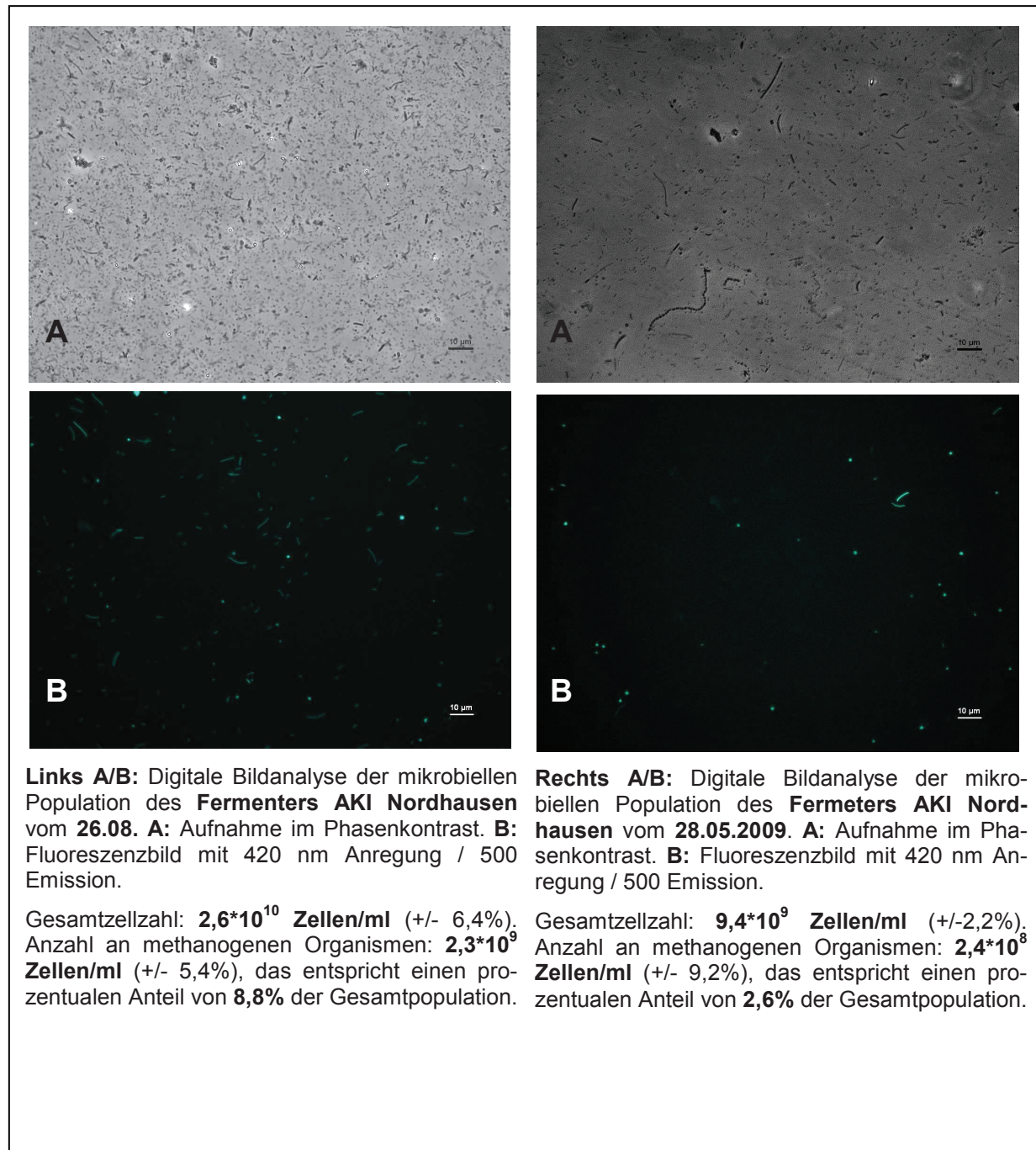


Abbildung 20: Bildanalyse der mikrobiellen Population im Fermenter vom 26.08.08 und 28.05.09 (Durchführung an der HAW Hamburg)

Vergleicht man die Ergebnisse mit dem in Tabelle 5, Seite 41 angegebenen mikrobiellen Qualitätsindex zur Bonitierung von Biogasanlagen, so liegt im Fermenter ein deutlicher Mangel bzw. eine Hemmung vor. In Scherer 2009 wird angegeben, dass wenn die Zahl der Methanbildner auf unter 5 % der bakteriellen Gesamtpopulation sinkt, man nach den Erkenntnissen an der HAW davon ausgehen kann, dass der betreffende Reaktor ernsthafte Leistungsprobleme hat. Das Problem ließe sich in gewisser Weise durch erhöhte Biomasse im Reaktor kompensieren.

Tabelle 5: Mikrobieller Qualitätsindex zur Bonitierung von Biogasreaktoren (Scherer 2009).

Reaktor-gesamt-bakterien	Reaktor-zustand	Methanbildende Archaea an der Gesamtpopulation	Reaktor-zustand
$>10^{10}$ /ml	sehr gut	$> 15 \%$ (Spitze ca. 25 %)	sehr gut
10^9 - 10^{10} /ml	normal	$> 10 - 15 \%$	gut**
$< 8 \times 10^9$ /ml	Mangel oder Hemmung	$> 5 - 10 \%$	mittelmäßig**
		$< 5 \%$	Mangel oder Hemmung**

**Die Bonitierung bezieht sich in erster Linie auf die Rübenvergärung. Bei stärker faserreichem Material (Mais) ist die hydrolytische Begleitflora meist erhöht und in einem solchen Fall bedeutet 5% Methanbildner noch ein gutes Ergebnis. Die Grenze zum Mangel läge dann bei $< 3\%$.

Bezüglich der geringen bakteriellen Gesamtpopulation und der stark gesunkenen Anzahl an methanogenen Bakterien wurde das Gärmedium am 28.05.2009 mit Champignonsubstrat beimpft.

Methanosaeten haben eine Verdopplungszeit von etwa einer Woche und sind folglich sehr langsam wüchsig. Am 09.06.2009 wurde der Fermenter vorsichtshalber erneut mit 100 Litern und am 17.06.2009 mit 180 Litern Schweinegülle der VAN Asten Tierzucht Nordhausen beimpft. Bei der derzeitigen Feinjustierung der Fuzzyregelung war die biologische Schräglage des Reaktors zu groß, um genügend schnell gegenzusteuern. Eine Spurenelementelösung (nach DSMZ Medium 144) wurde am 29.06.2009 zugegeben.

Die Summe der durchgeführten Maßnahmen führte zur Stabilisierung des Fermentermilieus sodass die Fuzzy-Logikregelung am 15.06.09 wieder zum Tragen kommen konnte. Diese regelte sofort die tägliche Beladungsmenge auf den eingestellten Maximalwert (ORLmax) von $3 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ hoch.

Zeitraum 01.07.2009 bis 30.09.2009 (402. – 492. Versuchstag)

Trotz Beimpfung des Fermenters und Zugabe der Spurenelementelösung erholte sich die täglich produzierte Gasmenge nicht wesentlich, woraufhin am 03.07.2009 die Gasuhr ausgebaut wurde. Durch die Abscheidung von Kondensatwasser aus dem noch feuchten Biogas kam es zur Wasseransammlung im Gasuhrinneren, welches den Defekt auslöste. Das Wasser wurde entfernt und die Gasuhr erneut installiert. Durch die defekte Gasuhr wurde die Fuzzyregelung in die Irre geleitet. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass bis zur Installation der neu beschafften Gasuhr am 12. August 2009 die dargestellte Gasmenge pro

Tag nicht realistisch ist. Dies belegt auch der erneute starke Anstieg nach dem Einbau des Gaszählers.

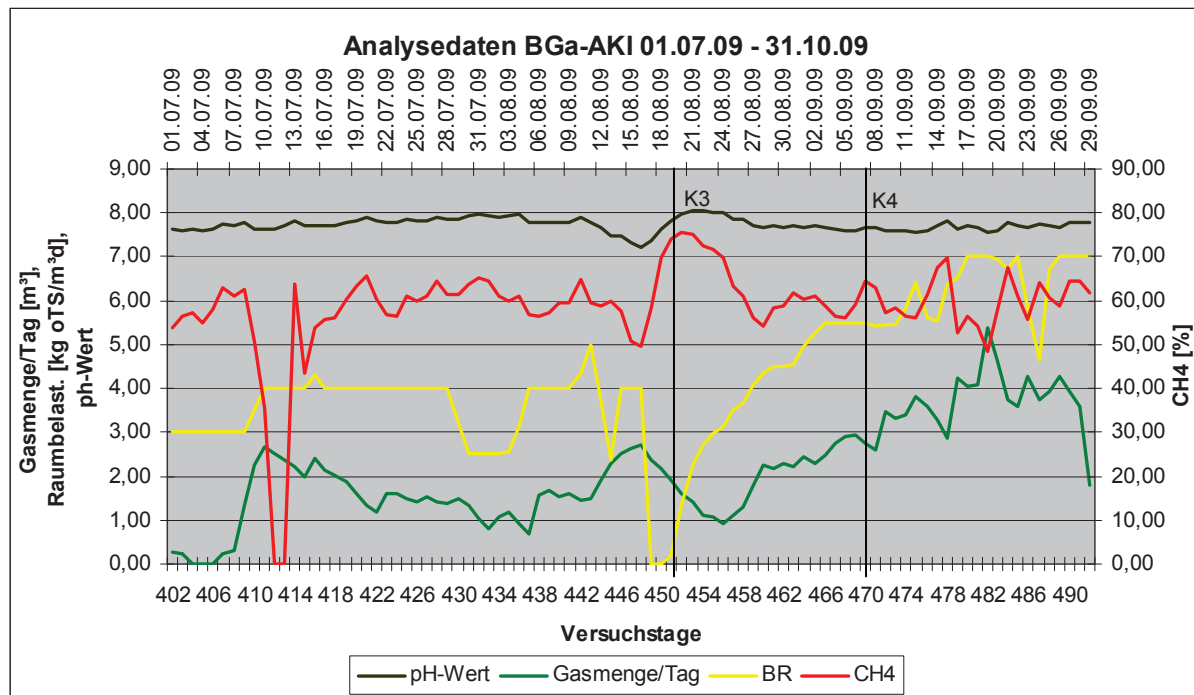


Abbildung 21: Analysedaten der Versuchsanlage 01.07.2009 - 30.09.2009

Am 09.07.2009 wurde die obere Begrenzung der Beladung (ORLmax) von 3 kg oTS/(m³ *d) auf 4 kg oTS/(m³ *d) erhöht. Die Fuzzy-Logikregelung regelte unmittelbar auf die maximal mögliche Beschickungsmenge.

Der Einbruch des Methangehaltes zwischen dem 10.07.2009 und dem 14.07.2009 resultiert aus einem Ausfall des Biogascontrollers BC20.

In Abbildung 22, Seite 43 ist ab dem 10.08.2009 (442. Versuchstag) ein deutliches Abfallen des pH-Wertes ersichtlich, bedingt durch den zeitgleichen Anstieg der Fettsäuren. Am 12.08.2009 (444. Versuchstag) wurde wartungsbedingt die im Fermenter installierte pH-Sonde kalibriert. Die ab der Kalibrierung gemessenen pH-Werte lagen jetzt um 0,2 niedriger als zuvor und verstärkten den Abwärtstrend.

Die Beschickung wurde am 17. und 18.08.2009 (Versuchstag 449/450) aufgrund des starken Anstieges der Säuresumme auf über 9.000 mg/l ausgesetzt. Am 20.08.2009 erfolgte daraus resultierend eine Feineinstellung der kritischen Parameter-Werte (K3).

Eine weitere Erhöhung der maximalen täglichen Beschickungsmenge erfolgte am 02.09.2009 von 4 auf 5 kg oTS/(m³ *d). Die Feineinstellung des Parameter-Wertes z und somit eine 4. Korrektur erfolgte am 08.09.2009. Diese gewährleistet eine verringerte Steige-

rung der über die Regelung jeweils 30 Minuten vor der Beladung berechneten neuen Beschickungsmenge ORL_{neu}. Die Fettsäurewerte stabilisierten sich nach K4, trotz gesteigerter Beladung, bei 5000 mg/l. Daraus resultierend wurde ORL_{max} auf 7 kg oTS/(m³ *d) erhöht, welches nur einen geringen Anstieg der Säuresumme nach sich zog.

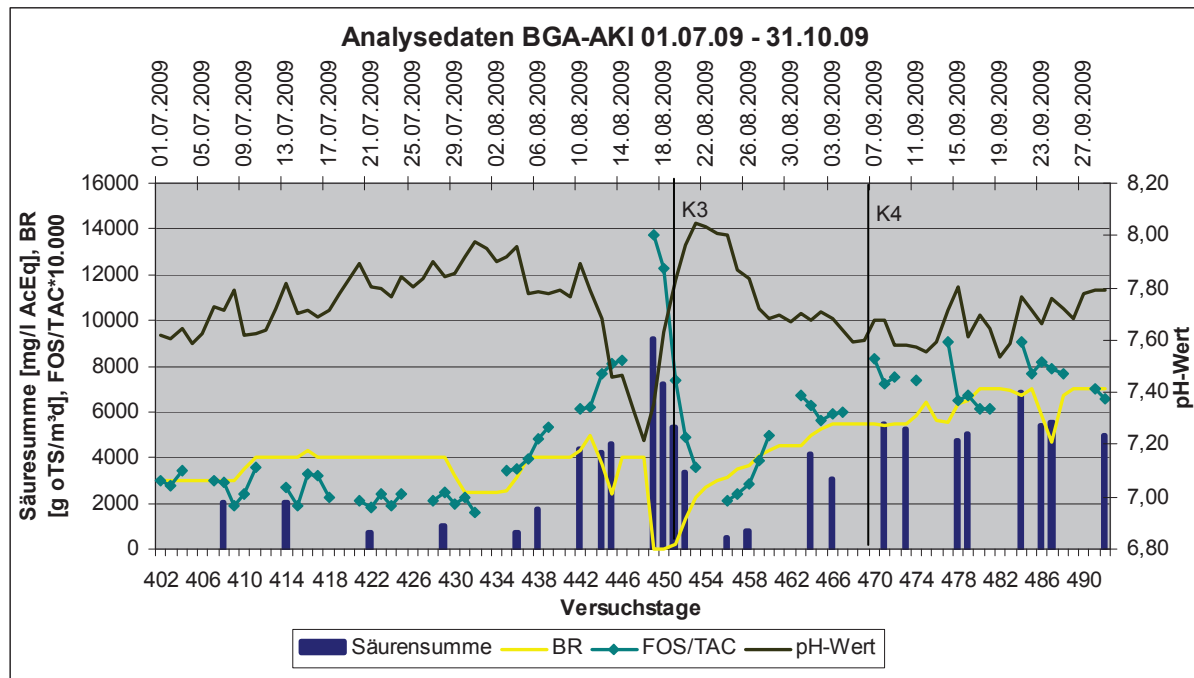


Abbildung 22: Analysedaten der Versuchsanlage 01.07.2009 - 30.09.2009

Zeitraum 01.10.2009 bis 31.12.2009 (493. – 585. Versuchstag)

Durch den stabilen Betrieb der Versuchsbogasanlage über vier Wochen bei einer Raumbelastung von maximal 7 kg oTS/(m³ *d) wurde am 02.10.2009 eine Steigerung der maximalen ORL auf 9 kg oTS/(m³ *d) durchgeführt. Die Regelung erhöhte schrittweise bei jeder Beladung die neu berechnete ORL, sodass bereits nach drei Beschickungen, sprich 24 Stunden später, die maximal mögliche Beschickungsmenge von 9 kg oTS/(m³ *d) erreicht war.

Zwischen dem 05.10.2009 und 06.10.2009 (497. und 498. Versuchstag) kam es zu einem Defekt an der Gasuhr mit einhergehender eingestellter Gasmessung. Daraus folgend regelte die Fuzzy-Logikregelung auf Basis der Bewertungskriterien die tägliche Beschickungsmenge fälschlicherweise nach unten. Verstärkt wurde dieser Trend durch das zeitgleiche Abfallen des pH-Wertes, resultierend aus gestiegenem Fettsäuregehalt.

In den Zeiträumen 508. bis 511. Versuchstag, 517. bis 519. Versuchstag sowie 521. bis 522. Versuchstag kam es zum Ausfall der Substratpumpe nach dem Beschickungsvorgang, mit einhergehender Unterbrechung des automatisierten Anlagenbetriebes. Eine Wiederaufnahme konnte erst nach manueller Quittierung der Störmeldung erfolgen. Da einige Störungs-

zeiträume auf Wochenenden fielen, konnte der automatisierte Beschickungsbetrieb teilweise erst nach max. 48 Stunden wieder aufgenommen werden. Die in Abbildung 23, Seite 44 minimierten Beschickungsmengen ergeben sich aufgrund der störbedingt ausgesetzten Beschickungen. Die Fuzzy-Logikregelung selbst berechnete für diese Zeiträume ORLneu konstant mit $9 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$.

Am 28.10.2009 (521. Versuchstag) wurde die maximale Beschickungsmenge auf $11 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ erhöht. Infolgedessen kam es zum Anstieg der Summe der Fettsäuren von 3.000 mg/l auf 8.700 mg/l am 536. Versuchstag. Die anschließende Verringerung der Säurewerte resultiert aus erneuten Störungen des Anlagenbetriebes im Versuchsmonat November. Diese wurden durch die starke Schaumbildung, mit zeitweise über zehn Zentimeter Mächtigkeit verursacht. Beim Beschickungsvorgang kommt es zum Anstieg des Füllstandsniveaus im Fermenter. Durch den Kontakt der Schaumkrone mit dem Füllstandsmesser meldet dieser eine Störung an das System. Die SPS schaltet, bis auf die Rührintervalle, alle automatisierten Vorgänge aus. Die damit einhergehende Abkühlung des Fermentermediums auf Raumtemperatur (17°C) über mehrere Stunden bis hin zu zwei Tagen, bewirkte eine Störung des auf starke Temperaturschwankungen sensibel reagierenden Bakterienmilieus und förderte die Schaumbildung zusätzlich. Vom 25.11.2009 bis 11.12.2009 wurde dosiert Entschäumer vom Typ „BC Spcon flüssig“ der Firma Schaumann dem Fermenter zugegeben. Jedoch blieb die Wirkung aufgrund der steten Störungen aus.

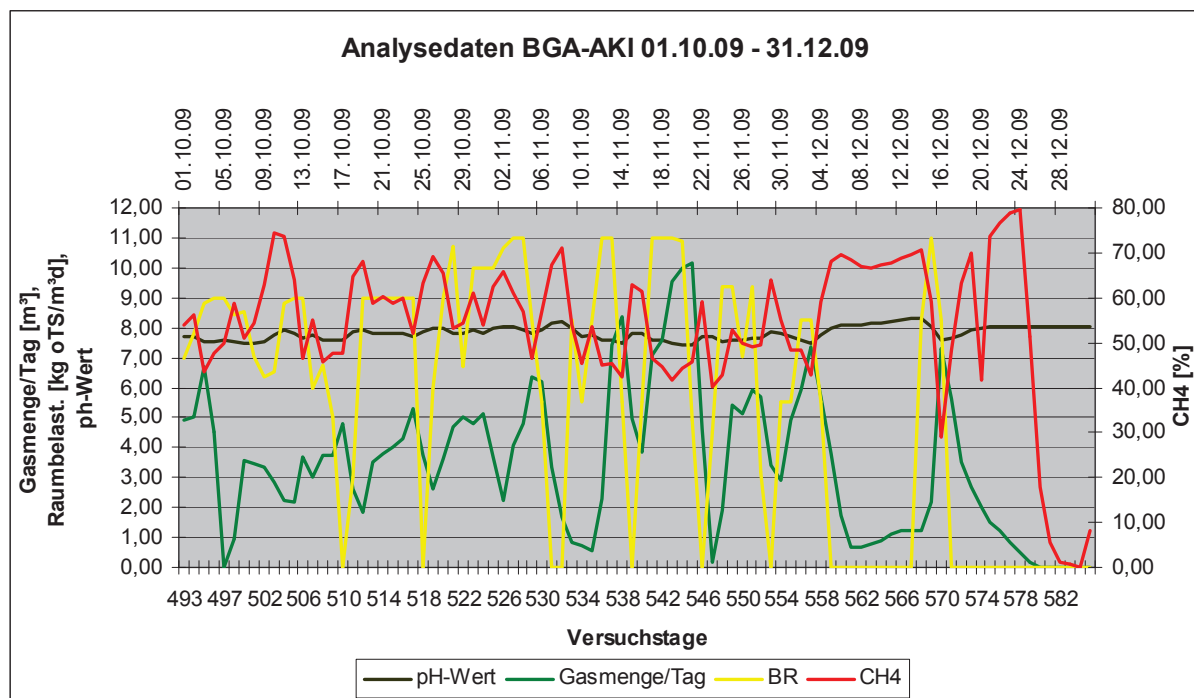


Abbildung 23: Analysedaten der Versuchsanlage 01.10.2009 - 31.12.2009

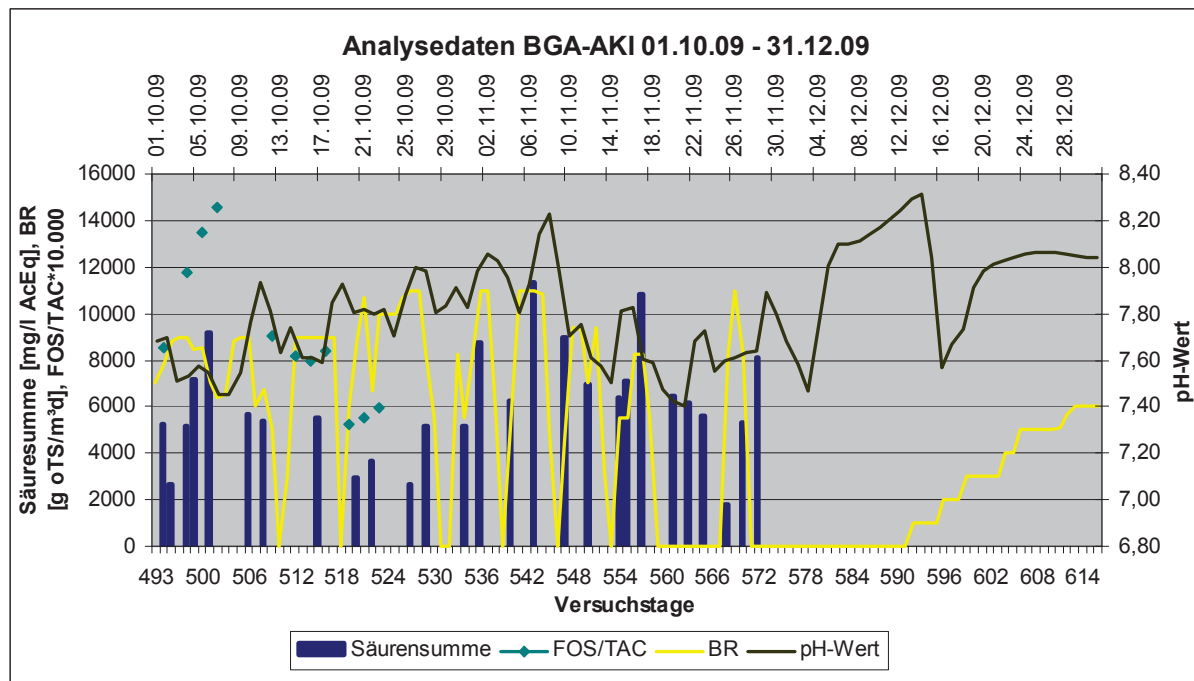


Abbildung 24: Analysedaten der Versuchsanlage 01.10.2009 - 31.12.2009

Eine Dauerstörmeldung mit Beschickungstopp wurde am 558. Versuchstag durch Schaumverschmutzung des Füllstandssensors im Fermenter ausgelöst. Die Störung konnte erst nach Ausbau und Reinigung des Sensors behoben werden. Zur Verminderung der Fettsäuresumme und der Schaumschwimmschicht wurde die Beschickung der Versuchsanlage bis zum 12.12.2009 ausgesetzt. Die anschließende Wiederaufnahme mit 11 kg oTS/(m³*d) führte zu einer erneuten starken Bildung der zuvor völlige aufgelösten Schaumschicht.

In Vorbereitung auf die hochschulinterne Winterpause wurden vom 16.12.2009 die Beschickung und am 18.12.2009 die Temperierung des Fermenters bis zum 04.01.2009 eingestellt, woraus der starke Abfall des Methangehaltes und der täglich produzierten Gasmenge resultiert.

Am 14.10.2009 erfolgte durch den Projektpartner HAW Hamburg eine erneute digitalen Bildanalysen der mikrobiellen Population im Fermenter der Versuchsbioanlage mit nachstehenden Ergebnissen.

Gesamtzahl (GZ) 14.10.2009	2,9x10 ¹⁰ /ml (308% des Wertes vom 28.5.09)
Methanbildner (MB)	4,5x10 ⁹ /ml (190% des Wertes vom 28.5.09)

Probe vom 28.5.2009	
Gesamtzahl (GZ)	9,4x10 ⁹ /ml
Methanbildner (MB)	2,4x10 ⁸ /ml

Im Vergleich zur fünf Monate zuvor analysierten Probe vom 28.05.2009 war eine deutliche Steigerung sowohl der Gesamtpopulation als auch der Methanbildner zu verzeichnen. Nach

dem in Tabelle 5, Seite 41 angegebenen mikrobiellen Qualitätsindex zur Bonitierung von Biogasreaktoren ist der Fermenterzustand bezüglich der Reaktorgesamtbakterien als „normal“ und die Anzahl der methanbildenden Organismen an der Gesamtpopulation als „sehr gut“ zu bewerten. Abbildung 25 zeigt den bildlichen Vergleich der mikrobiellen Populationen beider Fermenterproben.

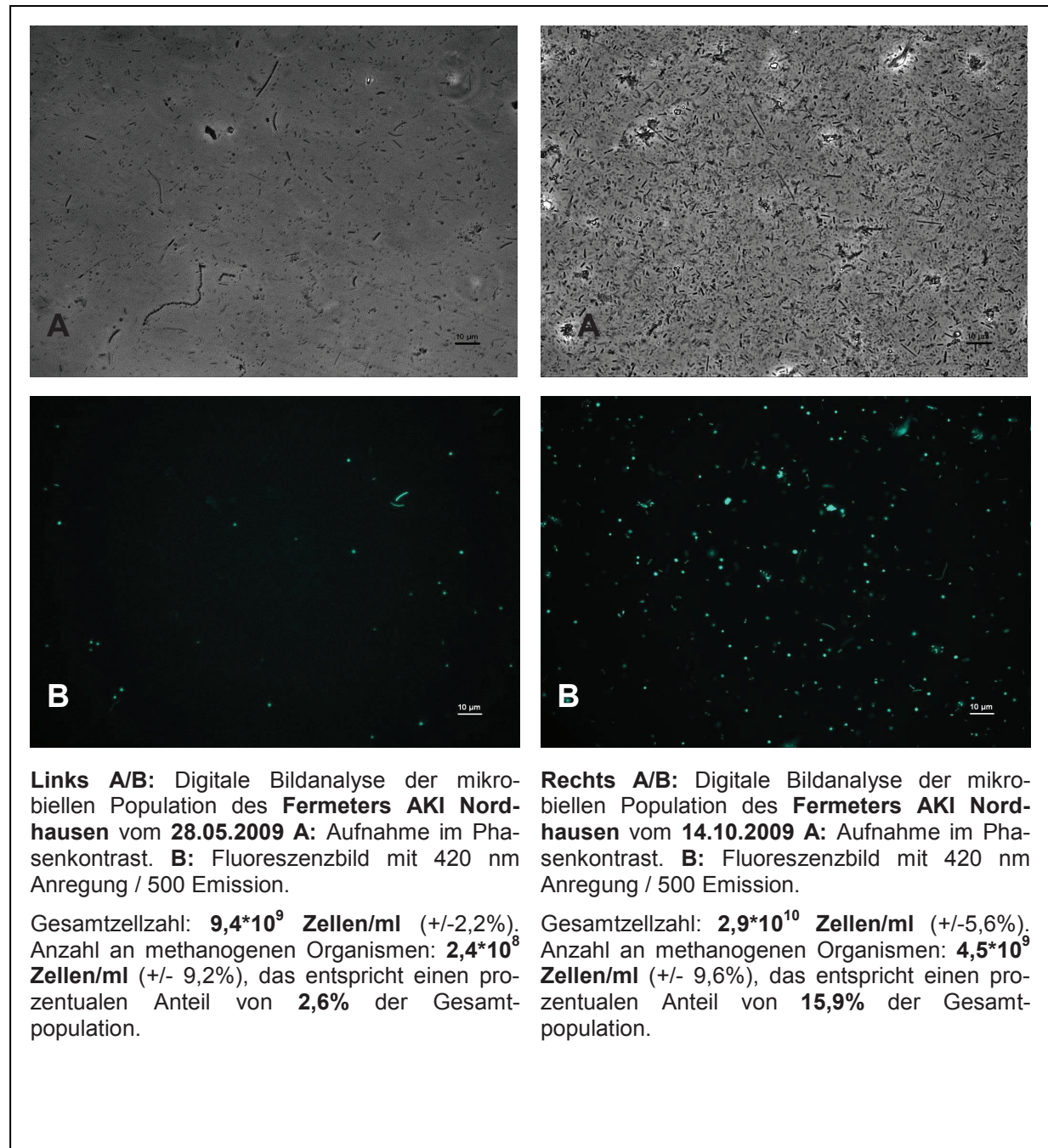


Abbildung 25: Vergl. Bildanalysen der mikrob. Population im Fermenter v. 25.05.09 u. 14.10.09 (Durchführung an der HAW Hamburg)

Zeitraum 01.01.2010 bis 16.04.2010 (586. – 691. Versuchstag)

Vom 06.01.2010 bis 20.01.2010 wurde im Rahmen der Wiederanfahrphase die Versuchsbogasanlage manuell über das am Fermenter angebrachte Beschickungsrohr einmal täglich beschickt. Die Raumbelastung wurde stufenweise erhöht (siehe Abbildung 26) und ab BR 5,00 kg oTS/(m³*d) die Fuzzy-Logikregelung reaktiviert (506. Versuchstag). Die Beschickung erfolgte nun wie zuvor drei Mal täglich aller 8 Stunden. Die eingesetzten Triticale wurden von der Biogasanlage Van Asten Tierzucht Nordhausen GmbH & Co.KG bezogen. Das vor Ort gemahlene Substrat wurde in handhabbaren Mengen im AUGUST-KRAMER-Institut der Fachhochschule Nordhausen bis zur Verwendung zwischengelagert. Aufgrund von Substratengpässen seitens des Substratlieferanten wurde den Triticale beim Mahlvorgang 30 % Gerste zugemischt. Daraus folgend kam es innerhalb der zweiten Versuchsreihe ab dem 05.02.2010 zu einem ungewollten Substratwechsel.

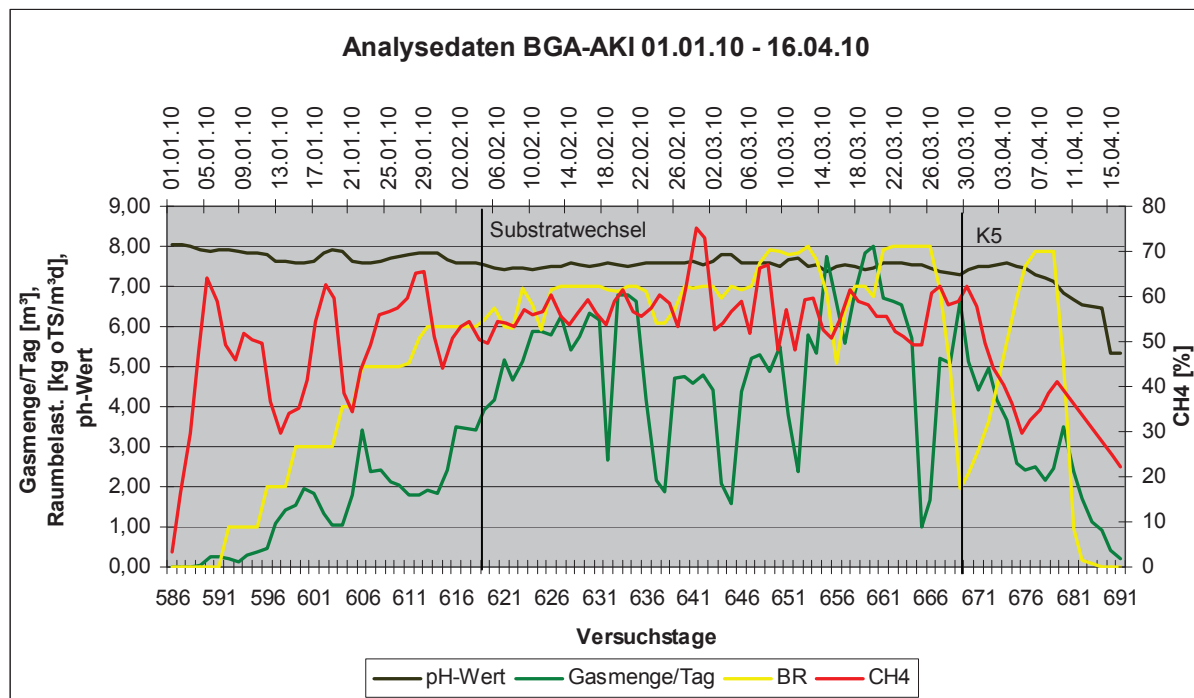


Abbildung 26: Analysedaten der Versuchsanlage 01.01.2010 – 16.04.12.2010, Teil 1

Am 648. Versuchstag wurde die Begrenzung der ORLmax von 7 auf 8 kg oTS/(m³*d) erhöht. Wie aus dem FOS/TAC-Werten ersichtlich (Abbildung 27, Seite 48), war der Gärprozess zu diesem Zeitpunkt stabil. Die FOS/TAC- und Fettsäurewerte zeigten nach der Erhöhung der Raumbelastung auf 7 kg oTS/(m³*d) am 03.02.2010 einen rückläufig Trend. Zwischen dem 634. und 681. Versuchstag konnten zu Lasten eines Gerätedefektes des Ionenchromatographen keine Fettsäurewerte bestimmt werden. Über den korrelierenden FOS/TAC war dennoch die Bewertung der Prozessstabilität gewährleistet.

Neunzehn Tage nach der Erhöhung der maximalen Beschickungsrate, am 667. Versuchstag, verschlechterten sich die zur Berechnung der Beschickungsmenge herangezogenen Prozessparameter pH-Wert und spez. GPR geringfügig. Die Fuzzy-Logikregelung minimierte daraufhin ORLneu mit jeder weiteren Beschickung auf letztlich 2 kg oTS/(m³*d). Diese drastische Minimierung der Beschickungsmenge erforderte, aufgrund der aus der Erfahrung der letzten Monate heraus als unkritisch anzusehenden Fettsäure- und FOS/TAC-Werte, eine neue Korrektur (K5) und Anpassung der Regelungsgrößen der Fuzzy-Logikregelung auf die veränderte Substratzusammensetzung mit einhergehenden niedrigeren durchschnittlichen pH-Wert.

Fuzzy-Regelungseinstellung K5, die eine Fehleinschätzung war, bewirkte eine sofortige Steigerung der Beschickungsrate auf letztendlich ORLmax (8 kg oTS/(m³*d)). In den darauf folgenden Versuchstagen „kippte“ daher die Biologie im Fermenter. Die Fettsäurewerte stiegen in Summe auf über 13.000 mg/l AcEq an und verursachten den niedrigen pH-Werte von 5,35 am 691. Versuchstag.

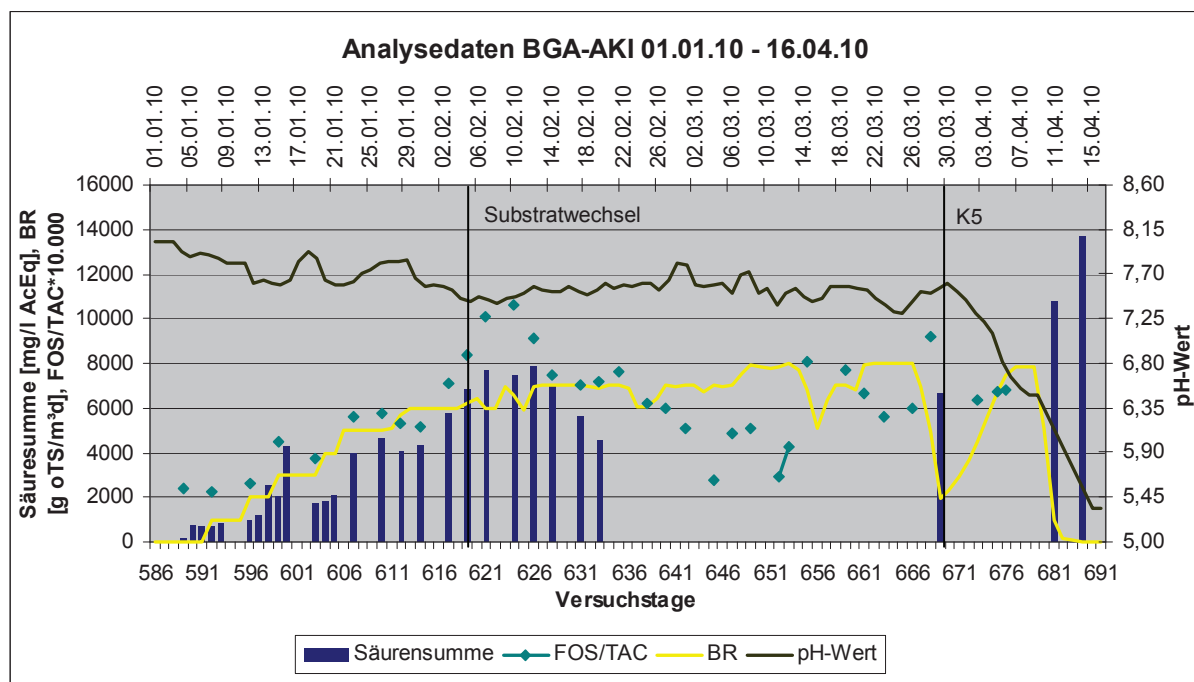


Abbildung 27: Analysedaten der Versuchsanlage 01.01.2010 – 16.04.2010, Teil 2

Eine vom Projektpartner HAW Hamburg am 29.03.2010 durchgeführte Bildanalyse der mikrobiellen Population im Fermenter ergab einen hohen Anteil von Methanbakterien an der Gesamtpopulation (11,6 %), vergleichbar der Bildanalyse vom 14.10.2009. Der Fermenterzustand konnte für diesen Zeitpunkt nach Tabelle 5, Seite 41 mit „gut“ bewertet werden.

Ergebnisse der Versuchsreihe II

Aus den Ergebnissen der zweiten Versuchsreihe lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Fuzzy-Logik geregelt konnte prozesssicher unter Verwendung von Triticale als Biogassubstrat eine Raumbelastung von $9 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ gefahren werden. Mit der maximal gefahrenen Raumbelastung von $11 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ konnte keine Prozessstabilität erreicht werden. Bedingt durch einen Stromausfall und einhergehenden Stillstand der Anlage über ein Wochenende mit Temperatursturz von 38 auf 17°C , kam es zur bakteriellen Stresssituation unter Hochlastbedingungen mit massiver Schaumbildung im Fermenter, die wiederum zu einer Kette von Störfällen führte (Vgl. Seite 53 folgende). Diesbezüglich ist die prozesssicher erreichte Raumbelastung von $9 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ bei einer Verweilzeit von 10 Tagen nicht als maximal mögliche Obergrenze anzusehen.
- Der unbeabsichtigte Substratwechsel ab dem 621. Versuchstag von 100 % Triticale auf ein Substratgemisch, bestehend aus 70 % Triticale und 30 % Gerste, bot die Möglichkeit der Simulation und Betrachtung der Reaktion der Fuzzy-Logikregelung im Bezug auf die Sicherung der Prozessstabilität bei plötzlicher Substratveränderung.
- Die Regelparameter der Fuzzy-Logikregelung war auf die Verwendung von 100% Triticale als Substrat eingestellt. Das Gemisch aus Triticale und Gerste bewirkte einen niedrigeren durchschnittlichen pH-Wert im Fermenter. Die Regelung bewertete somit den stabilen Prozess als negativ und regelte die ORL herab. Die 5. Korrektur der Parameterwerte und das darauf folgende „Kippen“ der Anlage lässt auf eine maximal mögliche prozesssichere ORL von $7 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ bei dem verwendeten Substratgemisch schließen. Nach der Neubeimpfung des Fermenters und einer 6. Korrektur sollte eine dritte Versuchsreihe im Zeitraum Mai 2010 weitere Ergebnisse liefern.

1.7 Versuchsreihe III

Infolge der Versäuerung des Gärmediums wurde am 22.04.2010 der Fermenter mit 300 Liter vergorener Gülle der Biogasanlage Van Asten neu beimpft. Der pH-Wert stieg daraufhin von 5,4 auf 6,9 an. Nach einem Beschickungsstopp von weiteren vier Tagen erfolgte ab dem 26.04.2010 die manuelle Beschickung unter täglicher Erhöhung der Raumbelastung um $0,5 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$.

Die Van Asten Biogasanlage verwendet als Substrat Maissilage und Triticale im Verhältnis 1:3 sodass die Gewichtungsfaktoren der Fuzzy-Logikregelung nicht mehr auf das nun im Fermenter vorliegende Medium abgestimmt waren. Eine 6. Korrektur am 30.04.2010 sollte

die Regelung anpassen. ORLmax wurde auf 8 kg oTS/(m³*d) begrenzt und die Fuzzy-Logikregelung reaktiviert. Sie regelte die aus der Versäuerung resultierende ORLneu von 0 kg oTS/(m³*d) in den darauf folgenden Versuchstagen langsam bis zu einer Raumbelastung von 7,5 kg oTS/(m³*d) hoch (siehe Abbildung 28).

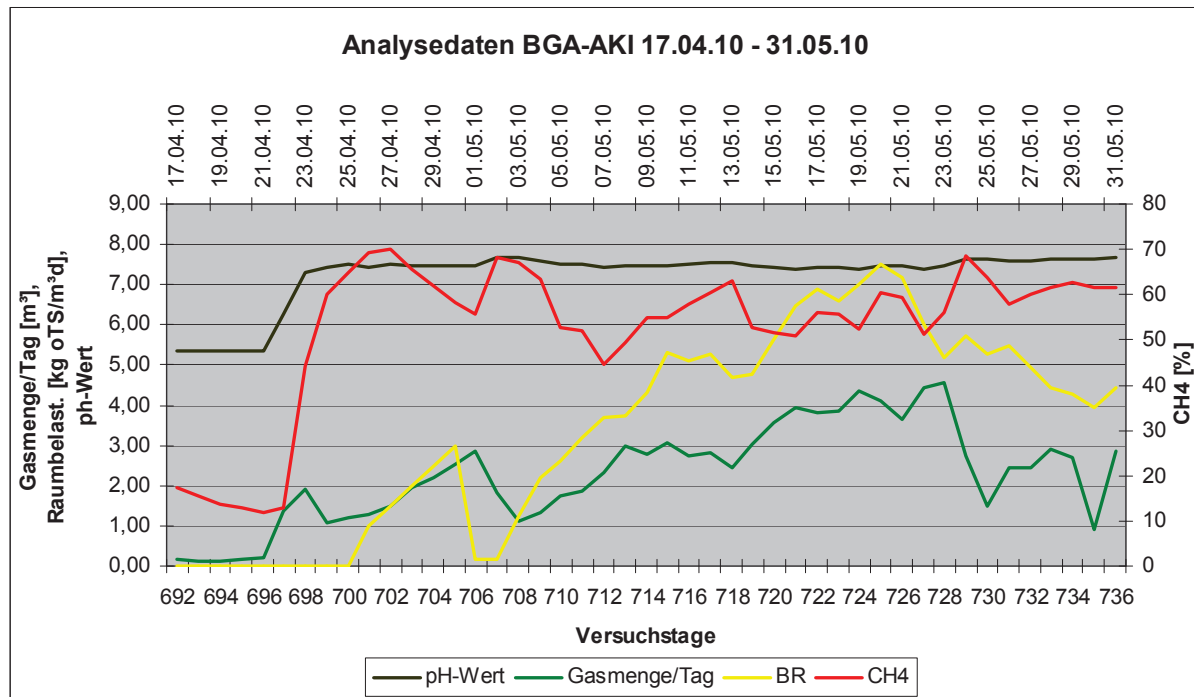


Abbildung 28: Analysedaten der Versuchsanlage 17.04.2010 – 31.05.2010, Teil 1

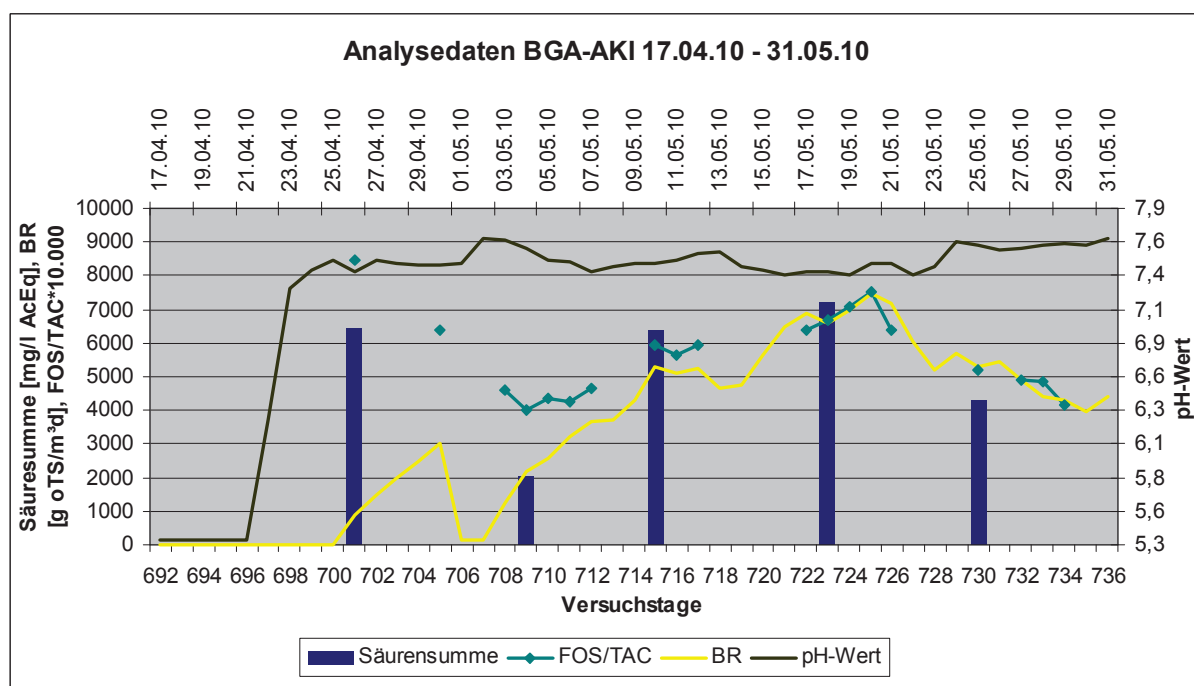


Abbildung 29: Analysedaten der Versuchsanlage 17.04.2010 – 31.05.2010, Teil 2

Infolge der steigenden Raumbelastung, dem damit einhergehenden Anstieg der Fettsäuren (siehe Abbildung 29, Seite 50), dem Fall des pH-Wertes sowie des als mittelmäßig bewerteten Methananteils kam es zur Minimierung der täglichen ORL durch die Fuzzy-Logikregelung auf 4 kg oTS/(m³*d) zum 736. Versuchstag. Die Versuchsreihe und das Vorhaben endeten an dieser Stelle.

Ergebnisse der Versuchsreihe III

- Im Rückblick auf die Zeitspanne bis zur Feineinstellung der Fuzzy-Logikregelung und des damit eintretenden Hochlastbetriebs der Biogasanlage konnten in der dritten Versuchsreihe keine durchschlagenden Ergebnisse in der Kürze der Zeit erwartet werden. Dennoch konnte durch eine einzige Korrektur basierend auf den Erfahrungen der letzten Monate und Jahre eine gute erste Einstellung der Gewichtungsfaktoren auf die veränderten Substratbedingungen (hoher Anteil an Maissilage in der Impfgülle und im Rezyclat) erreicht werden, wodurch eine Raumbelastung von 7,5 kg oTS/(m³*d) erzielt wurde.
- Tendenziell hätte sich die Regelung bei längerer Versuchsdauer wahrscheinlich bei 5,5 bis 6 kg oTS/(m³*d) stabilisiert. Aus einer weiteren Korrektur hätten durchaus höhere Raumbelastungen bei stabilem Fermenterbetrieb resultieren können.
- Eine maximale prozessstabile Raumbelastung für Biogassubstrate mit hohem Maisanteil kann aus den erhaltenen Ergebnissen nicht abgeleitet werden.
- Der Betrieb der Versuchsbiogasanlage mit anteiliger Maissilage im Biogasmedium führte zu mehreren technischen Problemen. Im Abstand von 3 bis 4 Tagen kam es zur Verstopfung des Überlaufrohrs vom Fermenter zum Auffangbehälter. Die faserige Maissilage legte sich um die in Fließrichtung ausgerichtete und horizontal schließende Platte des Schiebers und führte zur vollständigen Verstopfung. Für den Betrieb der Anlage mit Maissilage hätte der vorhandene Schieber gegen einen vertikal schließenden Plattenschieber ausgetauscht werden müssen. Die Maissilage bildete im Fermenter eine ca. 10 cm mächtige Schwimmschicht, die nur durch sehr hohe Rührleistungen vermieden werden konnte. Eine Störung der auf starke Strömungen empfindlich reagierenden Mikroorganismenpopulation ist nicht auszuschließen. Zusätzliche Rotorblätter in Höhe der Schwimmschicht wären für den Betrieb der Anlage mit Maissilage erforderlich gewesen.

1.8 Zusammenfassung der Ergebnisse und Diskussion

Die Projektlaufzeit erstreckte sich nach einer kostenneutralen Verlängerung von 7 Monaten über eine Gesamtlaufzeit 43 Monate.

Nach einer für das Vorhaben notwendigen Erweiterung der im AUGUST-KRAMER-Institut der Fachhochschule Nordhausen befindlichen kleintechnischen Versuchsbiogasanlage startete die erste Versuchsreihe, zunächst ohne Fuzzy-Logikregelung. Ein weiterer notwendiger Umbau resultierte daraus. Die vom Projektpartner HAW Hamburg validierte Fuzzy-Logikregelung wurde programmiert und am 23.10.2008 (24 Monate nach Projektbeginn) im Rahmen der zweiten Versuchsreihe aktiviert.

Die Fuzzy-Logikregelung wurde über einen Zeitraum von 736 Versuchstagen an der 1m³ Versuchsbiogasanlage getestet. Als Substrat kamen Triticale zum Einsatz. Ab dem 621. Versuchstag erfolgt ein unbeabsichtigter Substratwechsel von 100 % Triticale auf ein Substratgemisch bestehend aus 70 % Triticale und 30 % Gerste. Insgesamt erfolgten sechs Korrekturen der Gewichtungsfaktoren der Fuzzy-Logikregelung, aus denen ein prozessstabiles „Fahren“ der Anlage im Hochdurchsatzbereich resultierte. Im automatischen Fuzzyregelungsmodus wurde unter Verwendung von Triticalen mit Intervallbeladung eine prozessstabile ORL von 9 kg oTS/(m³ *d) und einer Verweilzeit von 6,7 Tagen (bei Rezirkulation!) erreicht. Die Gasbildungsrate betrug dabei durchschnittlich 4 m³/(m³ *d). Die Erhöhung der maximalen Beladungsrate auf 11 kg oTS/(m³ *d) führte zu massiven Schaumproblemen mit einhergehenden Störungen des automatisierten Anlagenbetriebes. Ab einer Raumbelastung von 9 kg oTS/(m³ *d) wurden wöchentlich Spurenelemente nach DSMZ (Medium 144) und nach Bedarf 10 – 20 g/m³ Entschäumer der Firma Schaumann zugegeben. Der Substratwechsel ab den 621. Versuchstag bewirkte eine Herabsetzung der prozessstabilen ORL von 9 auf 7 kg oTS/(m³ *d).

Von der im Vorhaben angestrebten Verwendung von Maissilage als Substrat wurde in Nordhausen abgesehen. Alternativ dafür fanden Experimente an der HAW in einem Referenz-Laborreaktor statt. Aufgrund mehrerer notwendiger Korrekturen der Gewichtungsfaktoren der Regelung kam es erst ab September 2009 (34. Projektmonat) zum Hochdurchsatzbetrieb der Versuchsbiogasanlage. Nur eine stabile Fahrweise über mehrere Monate liefert jedoch aussagekräftige Daten. Es wurde diesbezüglich dafür entschieden, die Versuchsbiogasanlage bis zum Projektende mit Triticalen zu beschicken. In Anbetracht dessen empfiehlt sich die weitere Optimierung der Regelung in einem Folgeforschungsvorhaben unter Verwendung von alternativen Substraten wie Maissilage.

Die Projektziele konnten voll und ganz erreicht werden. Die vom Projektpartner entwickelte und in das System der kleintechnischen Versuchsbiogasanlage der Fachhochschule Nord-

hausen integrierte Fuzzy-Logikregelung konnte mittels mehrerer Korrekturen zu einer im Hochlastbereich prozesssicher regelnden Fuzzy-Logikregelung weiterentwickelt werden. Der maximal stabile Hochdurchsatzbetrieb lag bei $9 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ für Triticale als Futtersubstrat. Die im Vorhaben angewendete Fuzzy-Logikregelung kann an bestehenden landwirtschaftlichen Biogasanlagen ohne Umbaumaßnahmen nachgerüstet werden, soweit die vorhandene Steuerung (SIMATIC) bereits die im FLC-Konzept enthaltenen Prozessparameter online erfasst. Allerdings erfordert die Regelung fehlerfreie Messparameter, die überwacht werden müssen. Die Regelung lässt sich auch über das Internet an einem handelsüblichen PC verfolgen.

2 Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für den Gesamtzeitraum des Verbundprojektes (01.11.2006 bis 31.05.2010) standen der Fachhochschule Nordhausen Mittel in Höhe von 164.763,00 Euro zur Verfügung. Diese unterteilten sich in die Positionen:

Position		Bewilligt	Ausgegeben
Personalausgaben			
0812/0817	Beschäftigte	114.989,06 €	114.955,40 €
0822	Beschäftigungsentgelte	13.771,46 €	13.014,31 €
Summe		128.760,52 €	127.969,71 €
Sächliche Verwaltungsausgaben			
0835	Vergabe von Aufträgen	20.037,32 €	20.605,31 €
0843	Sonst. Allg. Verwaltungsausg.	5.129,82 €	5.150,93 €
0846	Dienstreisen	500,00 €	24,10 €
Summe		25.667,14 €	25.780,34 €
0850	Gegenstände u. andere Investitionen von mehr als 410€	10.335,34 €	10.084,98 €
Gesamtsumme		164.763,00 €	163.835,03 €

Das Budget wurde eingehalten. Die nicht ausgegebene Restsumme in Höhe von 927,97 € wurde an die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. zurückerstattet.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Biogas ist im Ergebnis einer von der Unternehmensberatung Forst & Sullivan durchgeführten Analyse zum Markt von Biogasanlagen („Analysis of the Biogas Power Plant Market“, Report B 162) vom März 2003 eine ernstzunehmende Wachstumsbranche.

Im Jahr 2001 erreichte der Europamarkt für Biogasanlagen einen Gesamtumsatz von 385 Millionen Dollar, wobei sich das Leistungsvolumen um 218 Megawatt erhöhte. Nach der Analyse von Frost & Sullivan werden die Kapazitäten von Biogasanlagen in Europa weiter ausgebaut, so dass aus 1.505 MW installierter Kapazität 2001 ca. 4.275 MW im Jahr 2010 werden könnten.

Nach Angaben der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) beträgt die mittlere Verweilzeit in den evaluierten Thüringer Biogasanlagen 38 Tage, die Nachgärung einbezogen gar 51 Tage. Diese hohen Verweilzeiten sind inakzeptabel und erklären, dass sich viele

Anlagen am Rande der Wirtschaftlichkeit bewegen. Nach einer anderen Studie erreichen jetzige Co-Vergärungs-Biogasanlagen (ohne Zusatz von Fetten) lediglich Gasproduktionsraten von 1-2 m³ pro m³ Reaktorvolumen mit Futterrübensilage (aus Scherer und Lehmann 2009).

Die Anwendung der an der HAW Hamburg entwickelten und im Vorhaben optimierten Fuzzy-Logikregelung könnte entscheidend Abhilfe schaffen. Sie ermöglicht Betreibern von Biogasanlagen eine prozesssichere Fahrweise im Hochlastbereich. Daraus resultieren bei gleichen Fermentervolumen höhere Gaserträge. Die Wirtschaftlichkeit der Anlagen kann deutlich verbessert werden.

Im Projekt wurde ein wissenschaftlicher Mitarbeiter sowie ab Oktober 2008 eine wissenschaftliche Mitarbeiterin beschäftigt. Der Bedarf eines zusätzlichen befristeten Beschäftigungsverhältnisses ergab sich in der Phase der Inbetriebnahme der Fuzzy-Logikregelung. In diesem Rahmen kam es zu einem gesteigerten analytischen Aufwand und somit auch einem erhöhten zeitlichen Mehraufwand bei der Datenauswertung, welcher so abgedeckt wurde.

Alle geplanten Arbeitspakete wurden abgearbeitet.

4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

Mit Hilfe der Durchführung des Projektes und der daraus resultierten Implementierung und Optimierung einer Fuzzy-Logikregelung für nachwachsende Rohstoffe an der 1m³-Versuchsbiogasanlage ist es der Fachhochschule Nordhausen möglich, ihrem anwendungsorientierten und fachübergreifenden Profil gerecht zu werden.

Aus dem Forschungsvorhaben ergaben sich Themenstellungen, die von zwei Diplomarbeiten Bereich Umwelt- und Recyclingtechnik bearbeitet wurden. Zeitgleich konnten eine Vielzahl an Studenten der drei Ingenieurstudiengänge ihre praktischen Fähigkeiten und Kompetenzen auf dem Gebiet der Biogastechnologie, Laboranalytik und Informatik anwenden und erweitern.

Zusätzlich werden verschiedene Praktika in den drei Ingenieurstudiengängen Umwelt- und Recyclingtechnik, Regenerative Energietechnik und Technische Informatik durchgeführt.

Des Weiteren findet die Versuchsbiogasanlage und die installierte Fuzzy-Logikregelung sehr großes regionales und überregionales Interesse bei Betreibern und Interessenten sowie Firmen der Biogasbranche, so dass sich wichtige Zusammenarbeiten mit der Fachhochschule ergeben.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Von anderen Stellen wurden während des Vorhabens keine Anwendungen auf dem Gebiet der Regelung von Biogasanlagen mittels Fuzzy-Logik mitgeteilt bzw. publiziert.

6 Durchgeführte/ geplante Veröffentlichungen

Das Forschungsvorhaben sowie auch erste Ergebnisse wurden zum Biogasfachgespräch der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe am 15.11.2007 und auf der 11. Nachwuchswissenschaftlerkonferenz in Schmalkalden am 14.04.2010 vorgestellt. Des Weiteren wurde das Vorhaben in den Jahren 2007 bis 2010 zum „Tag der offenen Tür“ und zur „Langen Nacht der Wissenschaften“ an der Fachhochschule Nordhausen vorgestellt.

Weitere Veröffentlichungen sind im „Biogas Journal“ und im Magazin „Erneuerbare Energien“ geplant.

Literatur

- Abdul-Kholiq, M.; Scherer, P.A. (2002): Development of an expert control system for anaerobic digestion of food leftovers (cat food). In Proceedings of Anaerobic Digestion of Solid Wastes 2002, IWA World Congress, Technical University Munich
- Cheng, N.; Lo, K. V. (1998): pH as a real time control parameter in swine wastewater treatment process.-Environmental technology 19, S. 53-98
- Dobler, S.; Rohardt, S.; Scherer, P.A. (2002) Messdatenerfassung und automatische Dosiereinrichtung von Feststoffen unter LabVIEW für eine hochinstrumentierte Labor-Biogasanlage In: „Technische Systeme für Biotechnologie und Umwelt“, Band 11, IBA e.V., S. 297-313, Heiligenstadt
- Feitkenhauer, H.; von Sachs, J.; Meyer, U. (2002): One line titration of volatile fatty acids for the process control of anaerobic digestion plants.- Water Research 36, S. 212-218
- Holubar, Zani, L.; Hager, M.; Fröschl, W.; Radak, Z. and Braun, R. (2003): Start-up and recovery of a biogas-reactor using a hierarchical neural network-based control tool. J. Chem.Technol. Biotechnol. 78: 847-854
- Jung, U.; Schlüter, W.; Busch, G. (1999): Auswirkungen kurzfristiger Substratwechsel auf Prozesse zur Bioabfallvergärung. –Entsorgungspraxis 9, S. 21-25
- Patzwahl, S.; Nacke, T.; Frense, D.; Beckmann, D.; Vollmer, R.; Kramer, K.; Tautz, T. (2001): Prozesssicherheit an Biogasanlagen durch Einsatz von mikrocontroller- implementierten Softcomputingalgorithmen. – Proceedings 19. DECHEMA- Jahrestagung der Biotechnologie 13.-15. 03.2001, DECHEMA e.V., S. 508-510
- Scherer, P. A.; Vollmer, G.-R.; Fakhouri, T.; Martensen, S. (2000) Development of a methanogenic process to degrade exhaustively municipal „grey waste“ under thermophilic and hyperthermophilic conditions. Water Science & Technology 41: 83-91
- Scherer P., Lehmann K., Schmidt O., Demirel B. (2009): Application of a Fuzzy logic control system for continuous anaerobic digestion of low buffered, acidic energy crops as mono-substrate. Biotechnol. Bioengin. 102: 136-142
- Tippe, H.; Mauch, W. (1998): Entwicklung von Regelstrategien zur thermophilen zweistufigen Methanisierung fester, ligno- cellulosehaltiger Reststoffe. – Korrespondenz Abwasser 45 (1), S.71-78